SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©SP/AIRBUS - SP/ENERGY OBSERVER - GILLES ROLLE/REA - SP/REICHEL/DPA - KORNMESSER/AFP

LA SOLUTION HYDROGÈNE

Décryptage d'une nouvelle énergie verte p. 28

MARS 2021 - N° 889 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 889 - MARS 2021 - LA SOLUTION HYDROGÈNE

L 13418 - 889 - F: 5,30 € - RD

VIRUS VARIANTS
Comment les vaccins font face p. 60

Astrophysique

L'ÉTONNANTE DANSE DES TROUS NOIRS p. 40

DÉPASSEZ VOS HORIZONS

NOUVEAU 5008
7 PLACES

Automobiles PEUGEOT 552 144 503 RCS Versailles.

PEUGEOT i-Cockpit® AVEC SYSTÈME DE VISION DE NUIT*
CONDUITE SEMI-AUTONOME*
3e RANG MODULABLE*

Achetez sur **store.peugeot.fr**

MOTION & e-MOTION

* De série, en option ou indisponible selon les versions.

PEUGEOT RECOMMANDE TOTAL Consommation mixte WLTP(1) (l/100 km) : de 5 à 7,2. Émissions de CO_2 WLTP(1) (g/km) : de 132 à 163.
(1) Les valeurs de consommation de carburant, d'émissions de CO_2 et d'autonomie indiquées sont conformes à la procédure d'essai WLTP sur la base de laquelle sont réceptionnés les véhicules neufs depuis le 01/09/2018. Cette procédure WLTP remplace le cycle européen de conduite (NEDC) qui était la procédure d'essai utilisée précédemment. Les conditions d'essai étant plus réalistes, la consommation de carburant et les émissions de CO_2 mesurées

selon la procédure WLTP sont, dans de nombreux cas, plus élevées que celles mesurées selon la procédure NEDC. Les valeurs de consommation de carburant, d'émissions de CO_2 et d'autonomie peuvent varier en fonction des conditions réelles d'utilisation et de différents facteurs, tels que : la fréquence de recharge, le style de conduite, la vitesse, les équipements spécifiques, les options, les types de pneumatiques, la température extérieure et le confort thermique à bord du véhicule. Veillez à vous rapprocher de votre point de vente pour plus de renseignements. Plus d'informations sur peugeot.fr

GRANDE VITESSE, BAS CARBONE.

VOYAGER AVEC NOUS, C'EST MOINS DE CO_2 ÉMIS*

50 X MOINS QUE LA VOITURE

80 X MOINS QUE L'AVION

SNCF

RENDEZ-VOUS SUR OUI.SNCF, EN GARES, BOUTIQUES, AGENCES DE VOYAGES AGRÉÉES SNCF ET PAR TÉLÉPHONE.

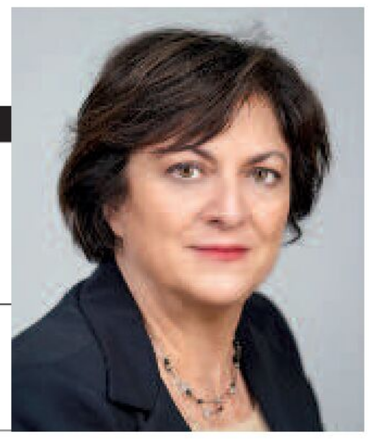
*Lors d'un voyage à bord d'un train à grande vitesse, sur un trajet longue distance en France, vous émettez 50 fois moins de gaz à effet de serre (GES) qu'en faisant le trajet en voiture partagée et 80 fois moins qu'en avion. Découvrez l'engagement environnemental de SNCF sur : sncf.com/fr/engagements/developpement-durable. Source : ADEME - mai 2020. Comparaison des émissions de GES exprimée en CO2 équivalent (CO2e) rapportées au voyageur/km pour le train TGV (consommation d'énergie de traction), avion court courrier et valeur moyenne voiture longue distance. Valeurs issues de la Base Carbone ADEME, dans le volet Données de l'article L1431.3 du code des transports - Information GES des prestations de transport. TGV INOUI est une marque enregistrée de SNCF Voyageurs. Tous droits de reproduction réservés. SNCF Voyageurs, SA au capital social de 157 789 960 euros, inscrite au RCS de Bobigny sous le numéro 519 037 584 – 9, rue Jean-Philippe Rameau – 93200 Saint-Denis Cedex. ROSA·PARK

TGV inOui

VOYAGEZ AVEC VOTRE TEMPS

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

Restaurer la confiance

Elle a été très vite taxée d'« infodémie » par l'Organisation mondiale de la santé. Une maladie de l'information en temps de pandémie. Boursouflée, l'« infobésité », trop-plein d'infos sur le Covid-19, est impossible à digérer sainement. Pendant ce temps, galopent les fausses nouvelles ou rumeurs qu'on appelait jadis « canards ». Rebaptisées #fakenews, elles voyagent en mode TGV sur les réseaux sociaux, gobées bien plus vite que toute info sérieuse et sourcée. Les mathématiciens-modélisateurs des réseaux savent mesurer le phénomène et les psycho-sociologues l'expliquer. Alors, que croire ? Et à qui faire confiance pour démêler le vrai du faux ?

La science — la méthode scientifique, la confiance accordée aux seuls faits scientifiquement prouvés — demeure pour la plupart d'entre nous un bien inestimable. C'est elle qui permet de lutter vraiment contre la pandémie. Dès le 10 janvier 2020, le séquençage en laboratoire du génome du virus Sras-CoV-2 était réalisé.
Une connaissance fondamentale immédiatement partagée dans le monde entier. Ce qui a permis de lancer aussitôt la conception de vaccins, obtenus moins d'un an après, dont les très novateurs « à ARNmessager ». Une victoire historique.

Mais le problème est autre. C'est celui vécu par les scientifiques eux-mêmes, dont la parole s'est brouillée. En France, et aussi aux États-Unis, ont éclaté au grand jour d'interminables polémiques sur l'utilisation de l'hydroxychloroquine comme traitement, l'usage des masques et autres billevesées sur des sujets pourtants sérieux... La sphère académique s'est débattue avec sa propre infobésité : 75 000 articles spécialisés écrits depuis les débuts de la pandémie dont certains, publiés trop vite, ont dû être rétractés. Le soupçon a grandi sur le désintéressement des scientifiques, la démarche menée pour le bien de l'humanité, apanage habituel de la recherche fondamentale. Fini, le sacerdoce ? Hors les controverses sur les plateaux de télévision ou dans les studios de radio, les tribunes multiples dans les journaux, les « rassurances » entre amis sur Facebook, les théories du complot sur Twitter, la parole directe a été tentée, une bonne moitié de Français estimant, par exemple, n'être pas assez informés sur les vaccins. Séances exceptionnelles à l'Académie des sciences, tables rondes approfondies, auto-examen des problèmes de communication... le tout disponible en ligne. Le public sera-t-il touché ? La crédibilité des spécialistes restaurée ? Renforcée ?

Quelques leçons comme antidote semblent émerger. Mieux savoir prendre la parole en public. Éviter de s'invectiver. Manier le doute avec circonspection. Faire la distinction entre médecins et scientifiques, quand les premiers n'ont pas la rigueur que l'on attend des seconds. S'assurer des différences entre ces derniers : un épidémiologiste n'est pas un virologue, qui n'est pas un anthropologue qui n'est pas un cancérologue... Qu'elle ou il sache dire « Je ne sais pas ». Enfin, le plus important : le scientifique n'est pas le décideur. En France, que chacun reste dans son rôle demeure une condition expresse de la confiance. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

« Astéroïdes : les nouvelles frontières de la connaissance »
(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 886, décembre 2020)

La dernière page de l'article sur les astéroïdes est consacrée aux ressources métalliques qui *« seraient présentes en quantité dans certains astéroïdes ». « Alors que les prix de certains métaux s'envolent (comme le cuivre) »* de nombreuses start-up rêveraient d'exploiter ces ressources. Les éléments suivants sont cités : (Terres rares, Pt, Au, Ti, Sc, Y...). La documentation disponible de la mission Psyche de la Nasa ne fait nullement allusion à cette prospective minière, pour de bonnes raisons. D'abord parce que les éléments cités ne sont pas présents en quantité suffisante dans les différents types de météorites connus pour que l'un d'entre eux puisse représenter un gisement. Ensuite parce que l'industrie minière est une industrie lourde.
Pour exploiter ce nickel nous aurions le choix entre rapporter sur Terre un morceau d'astéroïde et y effectuer le traitement métallurgique, ou bien de faire d'abord le traitement sur l'astéroïde et de ne rapporter que le nickel métal. Et si d'aventure nous avions la chance de trouver sur un astéroïde des lingots de nickel, nous devrions pouvoir rapporter sur Terre une fraction significative de la production mondiale annuelle de nickel : 2,3 millions de tonnes. À quel coût énergétique ?

Henri Bougault

S. et A. : Vous avez effectivement raison. L'exploitation des métaux précieux présents dans les astéroïdes, notamment les terres rares, pose d'immenses défis technologiques, pour l'extraction, le raffinage et le transport. Sans parler de la rentabilité, les pourcentages étant manifestement très faibles. La plupart des spécialistes restent ainsi dubitatifs, actuellement, sur l'exploitation minière des astéroïdes, sauf pour l'eau qu'ils contiennent. Il faudrait, dans tous les cas, apprendre à identifier les astéroïdes les plus intéressants, les « perles rares »! Et mieux comprendre comment les astéroïdes métalliques ont pu se former, et quelle est leur composition précise. La mission américaine Psyche, qui vise effectivement des objectifs scientifiques et qui doit être lancée en 2022, devrait apporter des éléments de réponse.

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Poissons gras

Dans « Les bienfaits de l'assiette anti-inflammation » (n° 887), vous notez qu'il faut consommer des poissons gras une fois par semaine au maximum. Ne serait-ce pas plutôt au minimum ? **Florence Collin**

« Les bienfaits de l'assiette anti-inflammation »,
Sciences et Avenir-La Recherche, n° 887, janvier 2021

RÉMY CORTIN POUR SCIENCE S ET AVENIR-LA RECHERCHE

S. et A. : L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) recommande pour la population générale de consommer du poisson deux fois par semaine en alternant un poisson gras à forte teneur en oméga 3 (saumon, hareng, maquereau, sardines, etc.), et un poisson maigre (cabillaud, merlan, sole, julienne, etc.).
Il est aussi conseillé de varier les espèces et les provenances afin de minimiser les risques de surexposition à certains contaminants tels que les PCB, les dioxines, et le méthyl-mercure. Par exemple, anguille, silure, carpe peuvent être contaminés par des dioxines et les PCB ; lotte, bar, raie, thon, dorade, sabre, par du méthyl-mercure.

Danger néonicotinoïdes

L'article « Betterave : la guerre des néonicotinoïdes est relancée » (n° 886, décembre 2020) soulève une problématique inquiétante. Lors de son application, étant donné que la plante ne fleurit pas, l'insecticide n'agit pas sur les fleurs. C'est seulement l'année suivante que l'insecticide remonte jusqu'à la fleur et qu'il est absorbé par les abeilles. Il est aussi véhiculé par la sève jusqu'aux feuilles ce qui me fait craindre que le sucre soit lui-même pollué. Concernant le miel ou le sucre quelle est la dangerosité pour l'être humain ? **M. Aire**

S. et A. : Les néonicotinoïdes sont effectivement très persistants et on les retrouve l'année suivant l'application dans les plantes produisant des fleurs susceptibles d'être butinées. Une étude de l'université de Neuchâtel (Suisse) a montré qu'on en retrouvait des traces dans 75 % des miels analysés. Mais l'effet sur la santé humaine reste inconnu. Au contraire du miel qui subit peu de transformations, le processus de purification et cristallisation du sucre élimine les résidus. Il n'y aurait pas de risque de passage des néonicotinoïdes dans le sucre du fait du processus de traitement de la betterave qui élimine tout résidu.

SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Directrice des rédactions Carole CHATELAIN - 01.55.35.56.57
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Rédacteurs en chef Mathieu NOWAK (mensuel) - 01.55.35.56.38
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la direction de la rédaction
Rachel MULOT (cheffe de services enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (médecine, biologie) - 01.55.35.56.52
Rédaction Bernadette ARNAUD grande reporteure (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Arnaud DEVILLARD (numérique, data) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN, Fabrice NICOT
Chroniqueurs Aurélien Alvarez, Christophe Cassou, Jean-Gabriel Ganascia, Céline Guivarch
Ont participé à ce numéro Pierre BERLOQUIN, Pierre KALDY, Marion DE VEVEY
Secrétaire de rédaction
Frank MIETTON (1er secrétaire) - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital
Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23
Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24
Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15
Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Documentation
Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49
Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48
Courrier des lecteurs
Sara De Lacerda - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Comptabilité - Ressources humaines
Mélanie BENKHEDIMI - 01.55.35.56.14
Fabrication Christophe Perrusson
Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGIE - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75
Directrice de clientèle et responsable Web
Karine GROSSMAN - 01.44.88.89.08
Assistante commerciale Séverine LECLERC - 01.44.88.97.57
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. - Tél. : 0155355600

Abonnements et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr
Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 €. 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique :
Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse :
Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

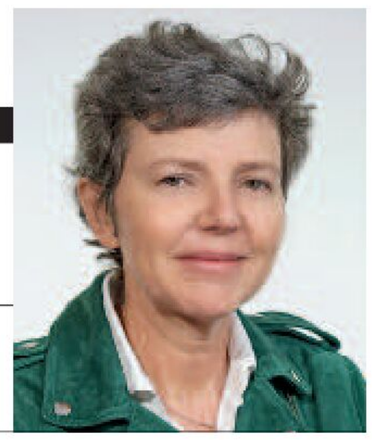
Origine du papier : Italie - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,017 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Newsprint (Lieusaint), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-3364
pefc-france.org

ACPM OJD DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un message « Paris Match » et un encart « Sophia Boutique-Atlas » sur toute la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0620 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par Presstalis.

ÉDITO


BERNARD MARTINEZ

Carole Chatelain
Directrice de la rédaction

Vrai départ ?

L'hydrogène est-il une solution d'avenir ? L'Europe, elle, a décidé d'y croire et investit plusieurs milliards d'euros pour mettre au point une filière efficiente. Pas facile pourtant d'utiliser cet élément qui est paradoxalement… le plus abondant dans l'Univers !
Comme l'expliquent nos journalistes Marine Benoît, Loïc Chauveau, Fabrice Nicot et Sylvie Rouat, nul ne l'a encore totalement amadoué et le nombre de « faux départs » dans cette course à l'énergie de demain ne se compte plus, comme ce fut le cas dans les années 1970. Mais cette fois, c'est la bonne ! assure Valérie Bouillon-Delporte, vice-présidente de l'association France-Hydrogène *(p. 31)*. L'hydrogène, en réalité la molécule de dihydrogène, n'est pas une énergie primaire mais un vecteur qu'il faut obtenir. À condition de savoir le conditionner en toute sécurité pour le transporter rappelle Bruno Debray, ingénieur à l'Ineris *(p. 34)*, et ce, sans polluer encore davantage. Car casser la molécule d'eau pour obtenir cet élément — comme les ingénieurs savent le faire depuis la découverte de l'électrolyse de l'eau voilà près de deux siècles — est vorace en énergie.

> « Trains, voitures, avions…, les lendemains seront H_2 verts ou ne seront pas ! »

Aujourd'hui, à l'heure où se produit une conversion massive à l'électricité, seul un hydrogène « vert », produit à partir d'énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire, doit être développé à grande échelle pour peu que l'Europe veuille tenir ses objectifs dans la lutte contre le réchauffement climatique, à savoir la neutralité carbone d'ici à 2050 *(p. 32)*. Et c'est principalement le secteur de la mobilité qui en sera le grand acteur, représentant en France environ 30 % des rejets de gaz à effet de serre : trains, voitures, avions… les lendemains seront H_2 verts ou ne seront pas ! Autre promesse que les scientifiques sont en passe de tenir : celle « d'entendre » l'écho de la danse fascinante entre deux trous noirs supermassifs sur le point de fusionner *(p. 40)*. Et ce, grâce à un nouveau type d'ondes gravitationnelles — ces « vagues » de l'espace-temps — qu'un réseau de radiotélescopes aurait détectées mais dont la mise en évidence a requis pas moins de dix ans d'analyse de données.
Patience cependant ! Comme toujours en sciences, les résultats devront encore être scrutés pour s'assurer qu'il s'agit bien d'un premier « murmure » jusqu'alors uniquement théorisé. Hors de portée de toute observation, ces astres noirs nous enverraient ainsi un signe précieux venu de galaxies lointaines… et l'espoir de pouvoir assister encore à d'autres danses fatales. ■ @carolechatelain

SUZUKI

Way of Life!*

*Un style de vie !

VITARA HYBRID

LIBÉREZ VOTRE ÂME D'ENFANT

À partir de
199€/MOIS (1)

ENTRETIEN INCLUS (2)
LLD 37 mois - 1er loyer 2 400 €
PRIME À LA CONVERSION 1500 € DÉDUITE
SOUS CONDITION DE REPRISE

Votre réunion téléphonique est terminée ? Il est temps de libérer l'enfant qui est en vous.
Faites-vous plaisir aux commandes du Suzuki Vitara Hybrid avec son système exclusif 4 roues motrices ALLGRIP.
Profitez du dynamisme du moteur BOOSTERJET HYBRID et des dernières technologies Suzuki Safety System.

Maintenant, c'est l'heure de la récréation !

Consommations mixtes gamme Suzuki Vitara (WLTP) : 5,4 à 6,5 l/100 km. Émissions CO_2 cycle mixte (WLTP) : 121 à 146 g/km.

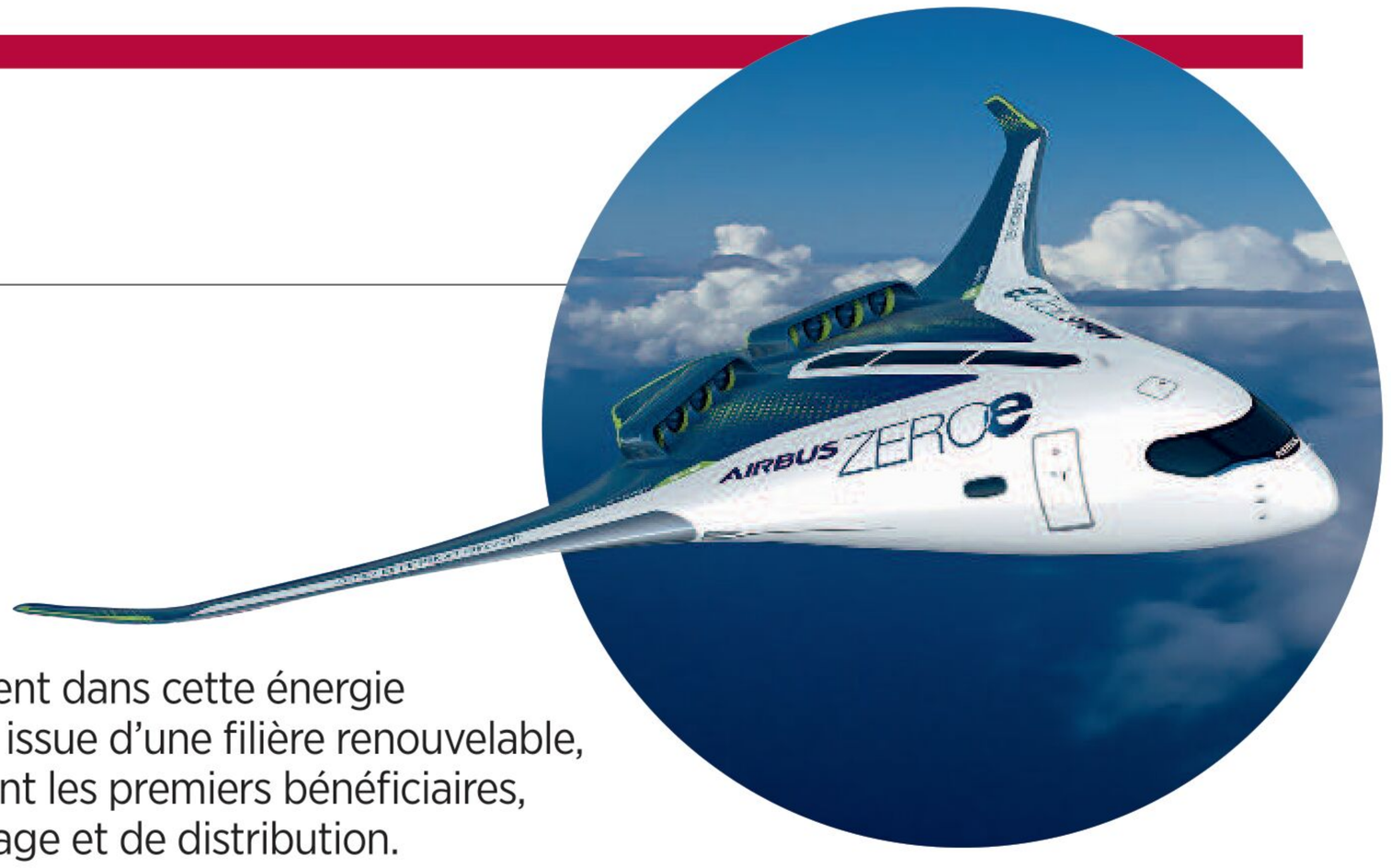
(1) Location Longue Durée pour 37 mois et 30 000 kilomètres pour un Suzuki Vitara 1.4 Boosterjet Hybrid Avantage, **1er loyer de 3 900 € couvert à hauteur de 1 500 € si éligible à la prime à la conversion*,** puis 36 loyers de 199 €. Offre réservée aux particuliers, **valable jusqu'au 31/03/2021 inclus,** dans le réseau participant. Sous réserve d'acceptation par Arval Service Lease - SA au capital de 66 412 800 € - n°352 256 424 RCS Paris. 1, bd Haussmann - 75009 Paris ORIAS n° 07 022 411 (orias.fr). **Modèle présenté : Suzuki Vitara 1.4 Boosterjet Hybrid Style option peinture métallisée So'Color, LLD pour 37 mois et 30 000 kilomètres, 1er loyer de 3 900 € couvert à hauteur de 1 500 € si éligible à la prime à la conversion*, puis 36 loyers de 249 €.** (2) Les loyers comprennent les services associés suivants (en option et dans les limites et conditions prévues aux contrats de LLD et d'Assurance) : Entretien inclus · Assistance + : 24h/24 7j/7 au véhicule et aux passagers · Assurance Perte Financière, souscrite auprès de Greenval Insurance DAC, compagnie d'assurance de droit irlandais, enregistrée sur le numéro 432783, siège social : Trinity Point, 10-11 Leinster Street South, Dublin 2, Irlande (info@greenval-insurance.ie) ; supervisée par la Banque Centrale en Irlande. Le détail du contenu des services associés est disponible auprès de Arval Service Lease. (*) Voir Conditions sur www.primealaconversion.gouv.fr.

Garantie constructeur 3 ans ou 100 000 km au 1er terme échu.

100e ANNIVERSAIRE

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche
N° 889 - Mars 2021



DOSSIER P. 28

Les promesses de l'hydrogène

La France a décidé d'investir massivement dans cette énergie non polluante — à condition qu'elle soit issue d'une filière renouvelable, solaire ou éolien. Les transports en seront les premiers bénéficiaires, une fois résolus les problèmes de stockage et de distribution.

5 **Éditorial** par Dominique Leglu
6 **Courrier**
7 **Édito** par Carole Chatelain

ÉVÉNEMENT

10 **La ruée vers Mars**

SCIENCES FONDAMENTALES

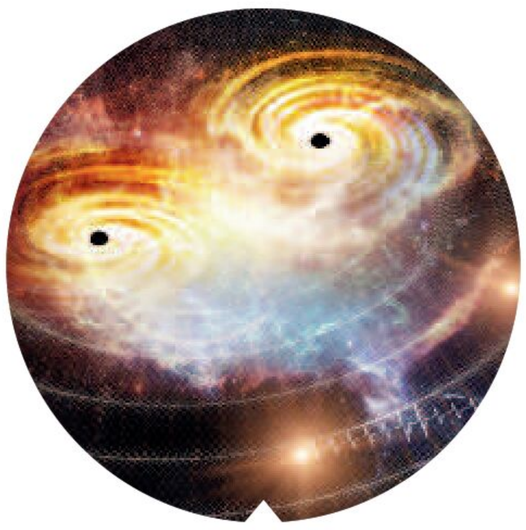
14 **ACTUALITÉS** / L'activité du Soleil est gravée dans les arbres / Ce robot mou imite les méduses / Titan recèle un lac profond de plusieurs centaines de mètres
40 **L'étonnante danse des trous noirs**
44 **La cyberguerre atteint les services publics**
47 **Les bactéries sont toujours à l'heure**
48 **D'improbables planètes « barbes à papa » parsèment le ciel**

NATURE

18 **ACTUALITÉS** / Le terrible bulletin de Météo France pour 2100 / Le « hibou de Harry Potter » fait une apparition à New York / Les araignées cousent des feuilles et piègent les grenouilles
50 **À Fukushima, le chantier du siècle**
55 **Les végétaux peuvent transmettre leur microbiote**
56 **Demain, les maisons seront en bois**
59 **Les bienfaits paradoxaux de l'interdiction de la pêche**

SANTÉ

22 **ACTUALITÉS** / Les groupes sanguins A, B et AB protégeraient des maladies intestinales / La génétique conditionne les préférences alimentaires / Tous les vrais jumeaux n'ont pas le même ADN
60 **Les vaccins à l'épreuve des variants**



Des ondes gravitationnelles inédites émises par deux trous noirs ont été observées **p. 40**

Dix ans après la catastrophe nucléaire de Fukushima, le défi du démantèlement **p. 50**

Comment adapter la vaccination aux variants du coronavirus ? **p. 60**

66 **L'aube des cœurs artificiels**
69 **Une IA a créé des bribes de génomes humains**
70 **Dossier spécial : Cinq questions pour (ré)apprendre à dormir**
74 **Nutrition : Faut-il encore suivre la règle des trois repas ?**
76 **Dix ans pour faire reculer le cancer**

HISTOIRE

26 **ACTUALITÉS** / Des paléomonnaies de l'âge du bronze / Ces vertèbres appartiendraient au plus gros dinosaure connu / Les vestiges d'un fort découverts en Alaska
80 **Sur les traces des Romains en Chine**
84 **La plus ancienne peinture rupestre se trouve en Indonésie**
85 **Dans le secret des blancs de Léonard de Vinci**

RENDEZ-VOUS

86 **La Recherche** Autour d'un livre
88 **Sélection livres**
90 **Le ciel de mars**
92 **Questions de lecteurs**
93 **La Recherche** Solution des jeux
94 **La Recherche** Dialogue sur la place des femmes dans la science
98 **La Recherche** Jeux

La Recherche RETROUVEZ NOS CHRONIQUEURS

49 **Maths : Aurélien Alvarez**
59 **Climat : Christophe Cassou et Céline Guivarch**
97 **Éthique : Jean-Gabriel Ganascia**

AIRBUS 2020 - DIDIER FLORENTZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE - MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE - MAXPPP

La ruée vers Mars

Pas moins de trois missions arrivent sur la planète Rouge. L'orbiteur des Émirats arabes unis va analyser l'atmosphère martienne tandis que les rovers chinois et américain vont explorer le sol et rechercher d'éventuelles traces de vie.

Par Franck Daninos @fdaninos

ILS ONT ATTEINT LEUR OBJECTIF à seulement quelques jours d'intervalle. Trois vaisseaux qui, après avoir parcouru des centaines de millions de kilomètres et voyagé sept mois dans l'espace, ont rejoint la planète Rouge, tel un tir groupé. L'orbiteur Al-Amal (« l'espoir » en arabe) tout d'abord, première sonde interplanétaire du monde arabe qui, sous pavillon émirati, scrute l'atmosphère de Mars depuis le 9 février. Elle a été suivie dès le lendemain par Tianwen-1 (« questions au ciel » en chinois), mission particulièrement audacieuse qui marque l'arrivée de la Chine sur la scène martienne. Après trois mois d'observations en orbite, elle devrait larguer une capsule contenant à la fois un atterrisseur et un véhicule motorisé. Enfin, le rover américain Perseverance a clos, le 18 février, cette fabuleuse caravane en se posant sur un ancien delta lacustre où de l'eau coulait il y a plusieurs milliards d'années. *« Si tout se passe comme prévu, ces missions feront grimper de huit à douze le nombre de robots martiens simultanément en activité : du jamais vu dans l'histoire de l'exploration planétaire ! »*, s'enthousiasme Sylvestre Maurice, de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (CNRS/Cnes/université de Toulouse).

AFP

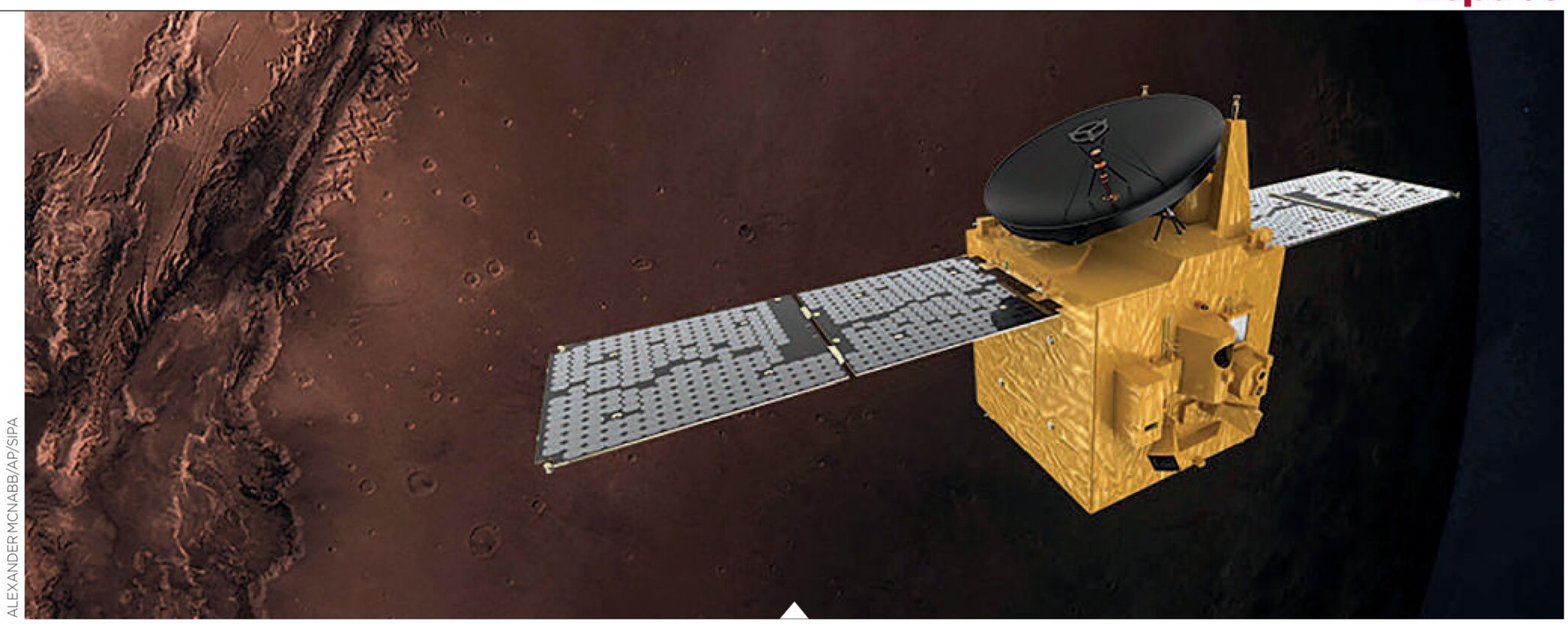
La première image du sol martien prise par le rover Perseverance après son atterrissage réussi le 18 février à 21 h 55.

Pourquoi un tel embouteillage ? Si les vaisseaux émirati, chinois et américain sont arrivés quasi en même temps sur la planète Rouge, c'est parce qu'ils ont tous quitté la Terre en juillet 2020. Ils profitaient alors de la même fenêtre de tir qui s'ouvre tous les vingt-six mois en moyenne lorsque la durée du voyage pour rejoindre Mars, et donc l'énergie nécessaire pour l'effectuer, est minimale. Ces trois missions visent toutefois des objectifs complètement différents, tant sur le plan scientifique, technologique que politique.

Nouveaux venus dans le paysage spatial international, les Émirats arabes unis (EAU) souhaitaient envoyer un message fort pour le 50e anniversaire de la Fédération. *« Il s'agissait de montrer, en organisant une mission d'exploration vers Mars, que le pays est à la pointe de la modernité et participe à la production des connaissances fondamentales. Source de prestige, le spatial sert aussi à renforcer la position des EAU au Moyen-Orient et à rassurer les investisseurs dans un contexte de diversification vis-à-vis des énergies fossiles »*, analyse Xavier Pasco, directeur de la Fondation pour la recherche stratégique. Novice dans le domaine des missions interplanétaires, le centre spatial Mohammed-Bin-Rashid de Dubaï a sollicité ainsi plusieurs laboratoires américains pour fabriquer un orbiteur de 1350 kg et équiper celui-ci de trois instruments (caméra haute résolution, spectromètres infrarouge et ultraviolet). Le vaisseau a, quant à lui, été propulsé par une fusée H-2A de l'Agence spatiale japonaise. *« Au point qu'il est difficile de dire qu'il s'agit à proprement parler d'une mission émiratie »*, constate Sylvestre Maurice.

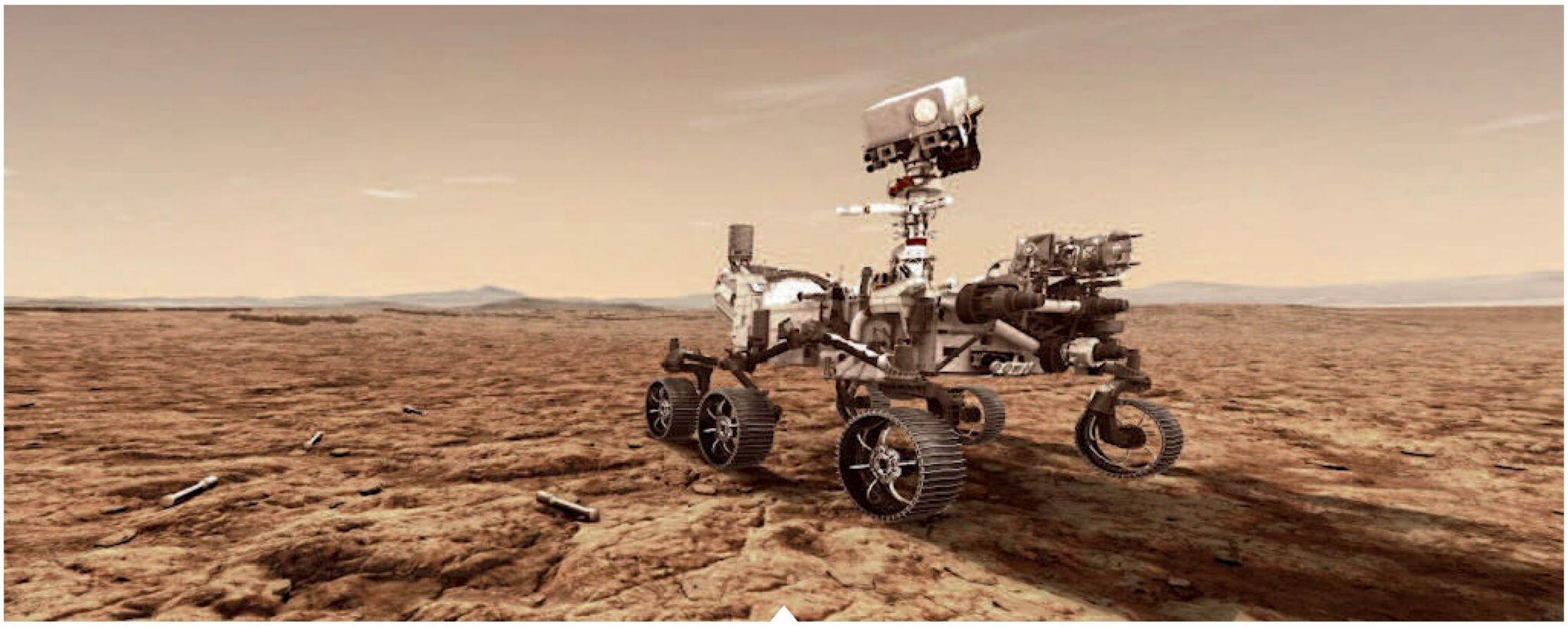
Comprendre la dynamique des phénomènes climatiques

L'intérêt scientifique n'en demeure pas moins indéniable. Car contrairement aux précédentes sondes martiennes insérées sur des orbites basses et circulaires, Al-Amal suivra des trajectoires elliptiques allant de 20 000 à 43 000 km de la surface, et inclinées de 25° par rapport à l'équateur. *« À l'apoastre, point le plus éloigné de l'orbite offrant une vue globale de la planète, la sonde pourra scruter l'atmosphère dans*



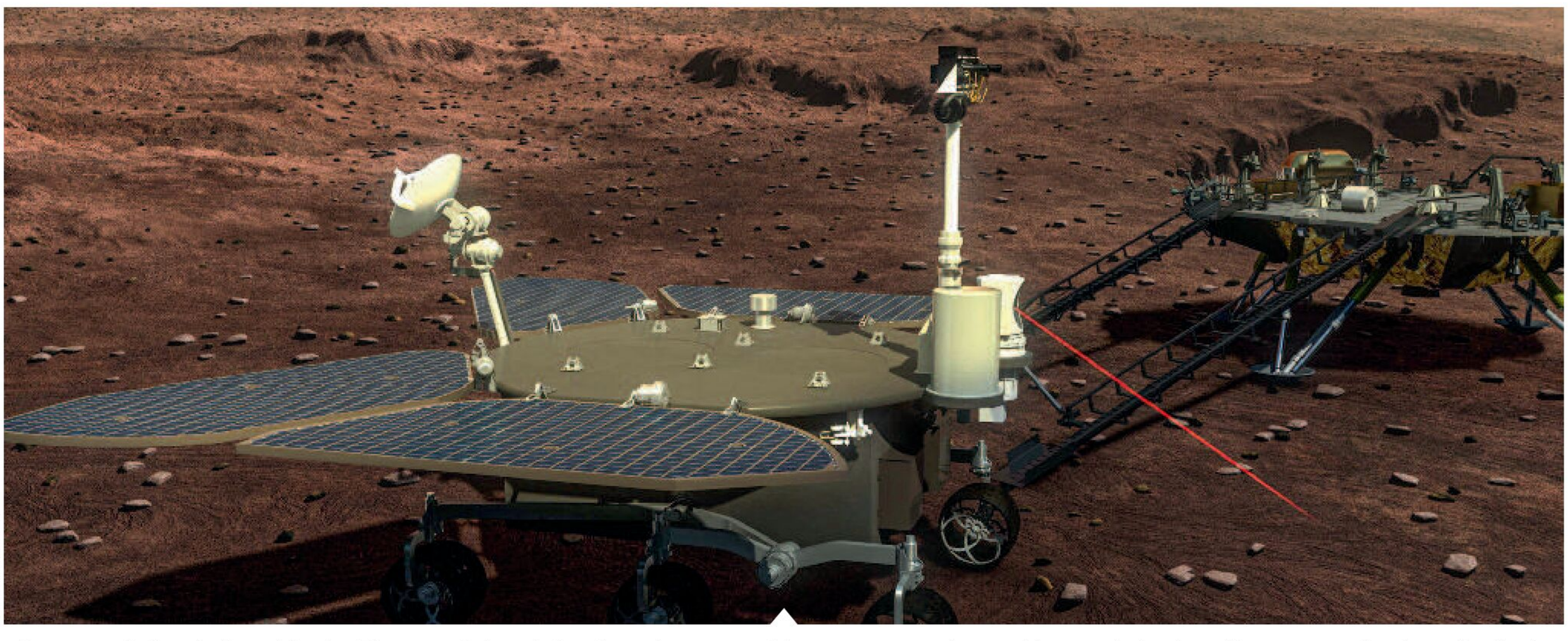
ALEXANDER MCNABB/AP/SIPA

La sonde Al-Amal des Émirats arabes unis va permettre de mieux comprendre les phénomènes climatiques de Mars (vue d'artiste).



NASA/JPL-CALTECH

Le rover Perseverance américain prélèvera des échantillons du sol martien et les encapsulera dans des tubes métalliques pour analyses (vue d'artiste).



XINHUA/AP/SIPA

Le rover de la mission chinoise Tianwen-1 devrait être largué par son orbiteur courant mai pour détecter de la glace d'eau souterraine (vue d'artiste).

toutes les régions et à différentes heures de la journée, pendant au moins une année martienne, soit environ deux années terrestres, précise Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes). *Des mesures très utiles pour mieux comprendre la dynamique des phénomènes climatiques sur Mars comme les tempêtes de poussières ou la formation des nuages.* »

Avec Tianwen-1, la Chine effectue elle aussi son baptême interplanétaire, s'aventurant pour la première fois au-delà de la Lune dans l'espace profond. Mais contrairement aux EAU, « *elle a conçu elle-même et avec une rapidité impressionnante l'essentiel des éléments de cette mission pionnière : lanceur lourd, vaisseau spatial et instruments scientifiques* », souligne Xavier Pasco. Le vaisseau, de presque cinq tonnes, transporte un orbiteur, un atterrisseur et un véhicule (astromobile) : aucune nation n'avait jamais combiné ces trois composantes en une seule mission. « *C'est très audacieux pour une première échappée martienne* », concède-t-il.

Muni de sept instruments servant principalement à des mesures de télédétection, l'orbiteur de 3175 kg étudiera la topographie et les structures géologiques de Mars : dunes, falaises, rivières asséchées ou reliefs des volcans. Et dans le courant du mois de mai, après qu'un site d'atterrissage aura été repéré dans les plaines d'Utopia Planitia, il larguera un atterrisseur de 1300 kg qui déploiera lui-même l'astromobile. Équipé d'un radar à pénétration de sol et d'une caméra multispectrale, l'engin de 240 kg disposera d'une autonomie de 90 jours. « *Ses caractéristiques ressemblent à celles du rover Opportunity que la Nasa avait déposé sur Mars au début des années 2000*, indique Francis Rocard. *Il devrait effectuer des analyses de roches ou détecter de la glace d'eau souterraine mais l'administration spatiale chinoise n'a communiqué que peu de détails sur les instruments.* »

Une maturité technologique exceptionnelle

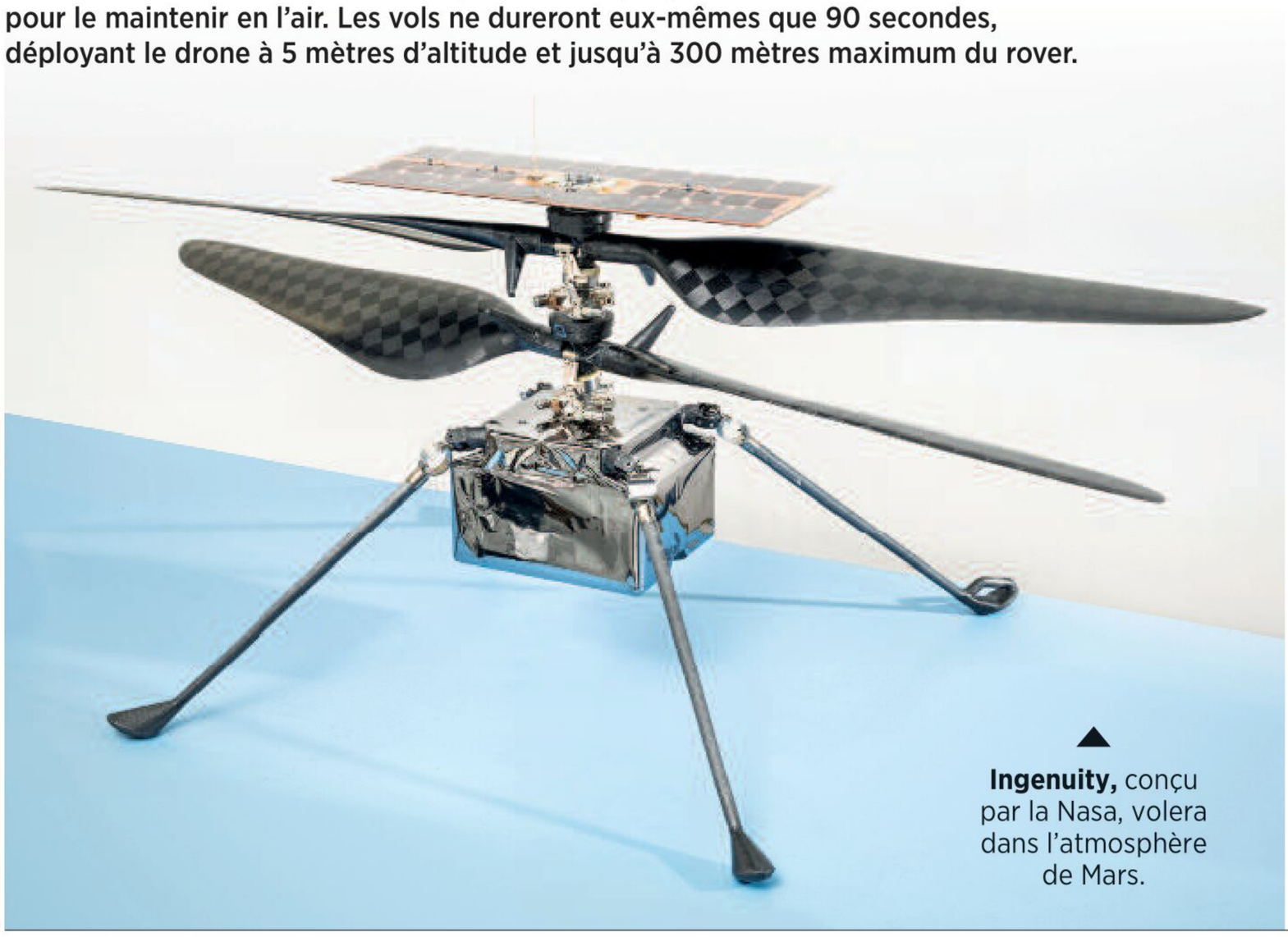
Le rover américain Perseverance est autrement plus perfectionné. Avec ses 3 mètres de long et 2,7 m de large, il est quatre fois plus lourd (1 025 kg) et au moins trois fois plus rapide (150 mètres/heure) que le véhicule chinois. Il devrait également fonctionner pendant plusieurs années au moyen de son générateur thermoélectrique à radio-isotopes, technologie utilisant du plutonium-238. Grâce à ses six roues motrices munies de rayons en titane, il pourra évoluer sur des terrains accidentés et sablonneux, escalader des rochers ou s'aventurer sur des pentes à 45° sans risquer une chute. « *Cinquième rover martien de la Nasa après Sojourner, Spirit, Opportunity et Curiosity, il bénéficie d'une "maturité" technologique exceptionnelle issue de plusieurs décennies de recherches* », relève Sylvestre Maurice, admiratif.

D'apparence assez similaire à Curiosity (le châssis est quasi le même), le nouveau rover embarque plusieurs équipements et démonstrateurs technologiques des plus innovants. Ainsi l'expérience MOXIE testera la production d'oxygène sur la planète Rouge par électrochimie à partir du dioxyde de carbone saturant l'atmosphère. Ou

EXPÉRIMENTATION

Le premier drone planétaire

Arrimé sous le châssis du rover américain Perseverance, un drone dénommé Ingenuity devrait prendre son envol dès les premières semaines de la mission. *« L'engin de 1,8 kg embarque une caméra de navigation et de cartographie mais aucun instrument scientifique*, prévient Pernelle Bernardi, de l'observatoire de Paris. *Il s'agit surtout de montrer qu'un aéronef peut voler dans l'atmosphère de Mars qui est 100 fois moins dense que celle de la Terre. »* Les pales en fibres de carbone tourneront ainsi très rapidement — jusqu'à 2400 tours/minute — pour le maintenir en l'air. Les vols ne dureront eux-mêmes que 90 secondes, déployant le drone à 5 mètres d'altitude et jusqu'à 300 mètres maximum du rover.



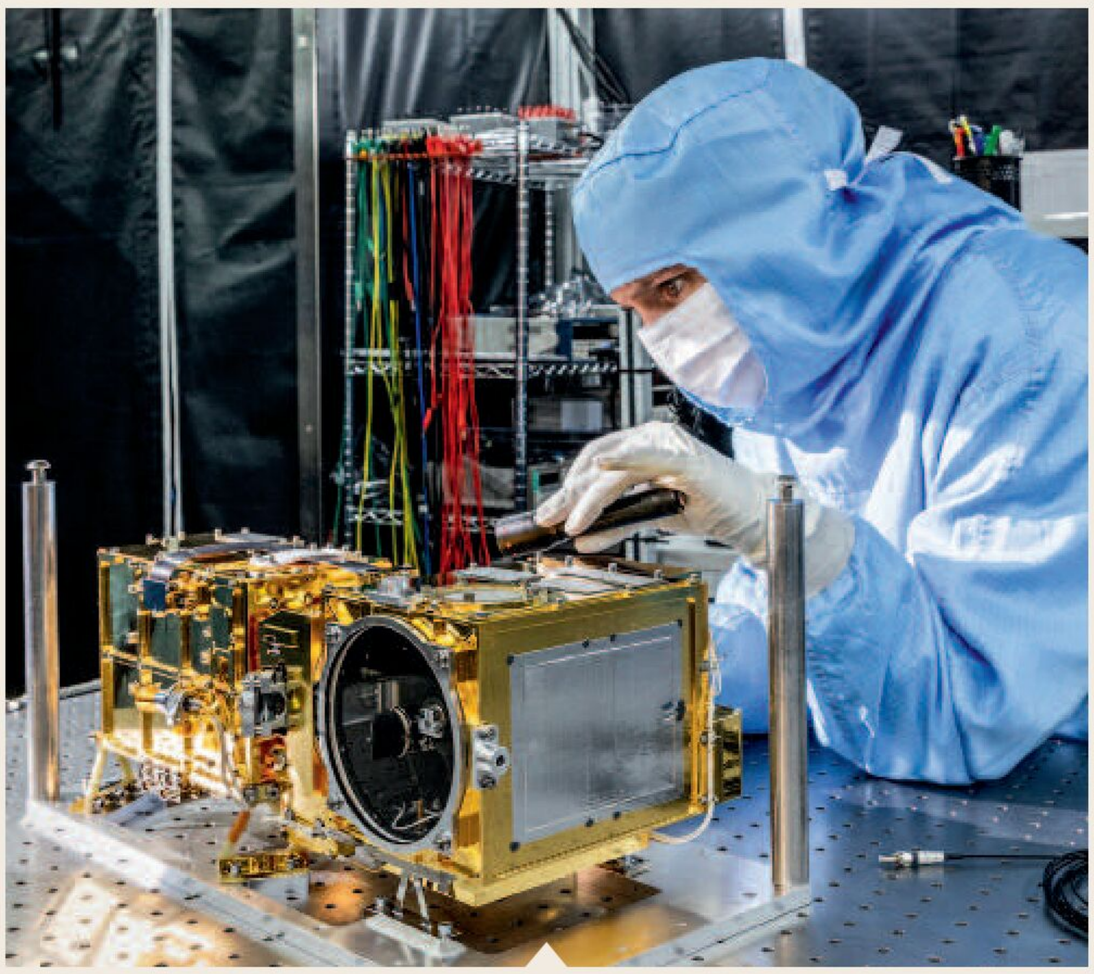
NASA/JPL-CALTECH

Ingenuity, conçu par la Nasa, volera dans l'atmosphère de Mars.

INSTRUMENT

SuperCam, l'atout français de la Nasa

Près de 300 scientifiques et ingénieurs français ont participé à la fabrication de SuperCam, l'un des principaux instruments du rover Perseverance de la Nasa qui vient tout juste de se poser sur Mars. Réalisés sous la direction de Sylvestre Maurice, les travaux ont duré cinq ans et mobilisé sept laboratoires universitaires et du CNRS. « *Après le rover Curiosity en 2012 et l'atterrisseur InSight en 2018, c'est la troisième fois que la Nasa nous sollicite pour ses missions martiennes, faisant de la France son principal partenaire étranger* », se réjouit l'astrophysicien. Installé dans le « ventre » du rover et au niveau du mât à 2 mètres de hauteur, SuperCam possède une caméra couleur ainsi que trois spectromètres. Tandis que le premier déterminera la composition chimique de roches chauffées par un laser, les deux autres analyseront (par des techniques Raman et infrarouge) leurs structures minéralogiques : « *la manière, autrement dit, dont les atomes sont associés et les molécules organisées entre elles, ce qui n'a jamais été réalisé depuis le sol martien* », indique Pernelle Bernardi, de l'observatoire de Paris. SuperCam recèle enfin un microphone, premier appareil martien à enregistrer les sons entre 10 et 10 000 hertz. « *Il servira à écouter les vents et évaluer la dureté des roches impactées par le laser* », précise l'ingénieure de recherche.



CNES/OLLIER ALEXANDRE

Sept laboratoires et universités françaises ont participé à la fabrication de l'instrument (ici dernières vérifications à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse).

encore Ingenuity, premier aéronef évoluant sur une autre planète que la Terre *(lire l'encadré ci-contre)*. Perseverance sera également équipé d'une nouvelle génération d'appareils scientifiques : en particulier SuperCam, fabriqué conjointement par les États-Unis et la France *(lire l'encadré ci-dessus)*. « *C'est un peu le couteau suisse de la mission. Il réalisera en effet cinq types de mesures à distance, depuis quelques mètres du rover jusqu'à l'horizon, guidant et aidant ce dernier à remplir ses deux objectifs principaux* », explique Pernelle Bernardi, du Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique de l'observatoire de Paris, qui a reçu la médaille de cristal du CNRS pour ses contributions décisives à SuperCam.

Perseverance cherchera, en premier lieu, à découvrir les traces d'une éventuelle vie passée. Le site où le robot a été parachuté abritait en effet un vaste lac dans lequel se jetaient des rivières formant plusieurs deltas. Les sédiments qui s'y sont accumulés il y a 3,5 à 4 milliards d'années — période où Mars ressemblait beaucoup à la Terre primitive avec des étendues d'eau liquide, une activité volcanique et un champ magnétique protecteur — pourraient receler ainsi des biosignatures ! « *Des biominéraux et des microfossiles, par exemple, ou des composés organiques trahissant l'existence d'une ancienne activité microbienne* », détaille Pernelle Bernardi. Autant de reliques que le robot géologue tentera de mettre au jour en analysant les roches environnantes avec SuperCam et sa batterie d'instruments. Les échantillons les plus prometteurs seront encapsulés dans une trentaine de tubes métalliques — deuxième objectif prioritaire de Perseverance. Ces fragments seront ensuite récupérés, à partir de 2026, par de prochaines missions conduites par la Nasa et l'Agence spatiale européenne, pour un retour sur Terre à l'horizon 2030. Encore une première. ■

F. PLAS / CNRS PHOTOTHÈQUE

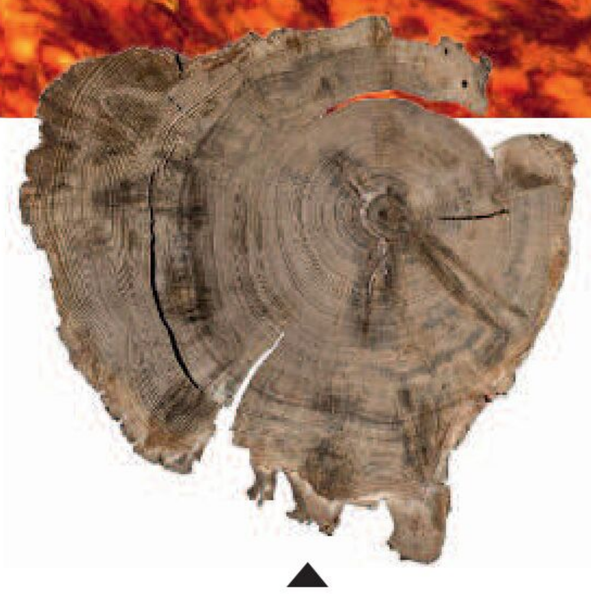
« Perseverance cherchera des composés organiques trahissant l'existence d'une ancienne activité microbienne »

Pernelle Bernardi, chercheuse au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique de l'observatoire de Paris

L'activité du Soleil est gravée dans les arbres

Les traces de carbone 14 dans les cernes renseignent sur les tempêtes solaires du passé.

ASTRONOMIE Les cycles d'activité du Soleil se lisent dans les cernes des arbres, affirment des scientifiques de l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse). Ils ont même réussi à les reconstituer sur une période s'étalant de l'an 969 à 1933, et à confirmer leur régularité : ils durent en moyenne 11,2 ans. L'augmentation de l'activité solaire, qui se traduit par un grand nombre de taches à la surface de notre étoile, a un impact direct sur l'atmosphère terrestre et notamment sur sa concentration en carbone 14. Or chaque année, les arbres emmagasinent dans leur tronc d'infimes quantités de carbone. En analysant les cernes d'arbres coupés en Angleterre et en Suisse, les scientifiques ont ainsi pu étudier la variation annuelle de l'isotope 14. Un excès important a été relevé pour les années 993, 1052 et 1279, trahissant des tempêtes solaires intenses survenues ces années-là. Les chercheurs étudient désormais des troncs fossilisés avec l'objectif de remonter le temps jusqu'à il y a 14 000 ans. Ce qui permettrait d'établir la succession des cycles solaires depuis la fin du dernier âge glaciaire. **J. I.**



En mesurant la variation annuelle du carbone 14 stocké par les arbres, les chercheurs ont pu reconstituer les périodes d'intense activité solaire.

NASA - ETH ZURICH

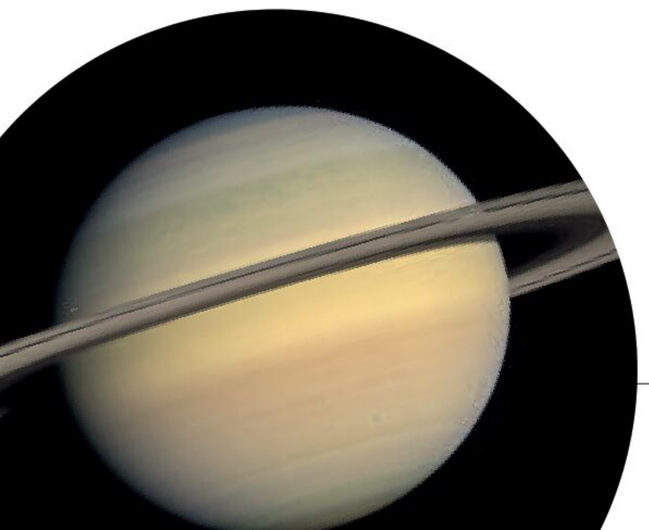
EN DEUX MOTS

ÉCHEC ET MARS. Après deux années de tentatives infructueuses, la Nasa met un terme à l'expérience HP³ de la mission Mars InSight qui devait creuser un trou de 5 mètres dans le sol martien. **TOULOUSE.** Alors que la ville rose accueillait déjà le commandement militaire de l'espace français, l'Otan a décidé de lui adosser son centre d'excellence spatiale. **ANNIVERSAIRE.** La sonde New Horizons a fêté ses 15 ans. Après avoir survolé Pluton et un astéroïde, elle continue à explorer la ceinture de Kuiper.

Saturne bascule à cause de ses lunes

PLANÉTOLOGIE L'axe de rotation de Saturne ne cesse de s'incliner depuis un milliard d'années. En cause : les satellites de la géante gazeuse qui s'en s'éloignent inexorablement, faisant ainsi basculer la géante aux anneaux. L'inclinaison actuelle de 26,7° devrait plus que doubler dans les prochains milliards d'années. **F. D.**

SOURCE : MELAINE SAILLENFEST, OBSERVATOIRE DE PARIS.

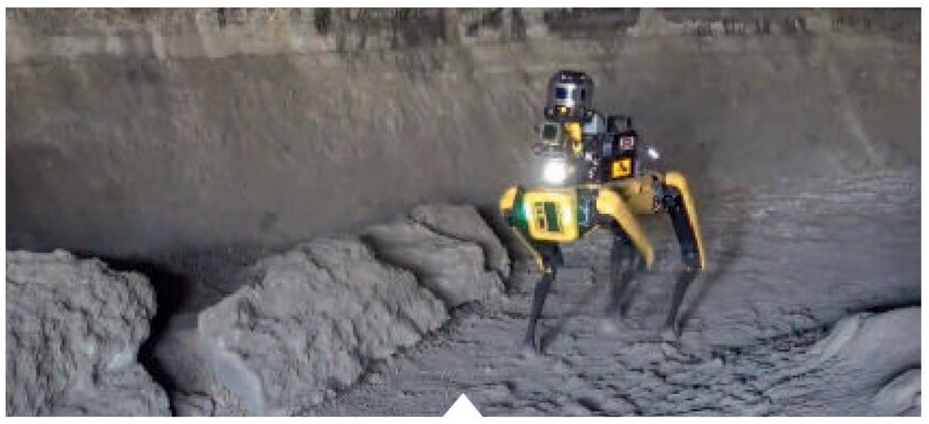


SIPA

L'axe de rotation de la planète aux anneaux continue de s'incliner.

Les sites d'alunissage des missions Apollo sanctuarisées

PATRIMOINE SPATIAL « Un petit pas pour protéger le patrimoine humain dans l'espace » : cette allusion aux paroles prononcées par l'Américain Neil Armstrong en 1969 est le titre d'une loi promulguée fin 2020 par les États-Unis. Elle oblige les entreprises américaines se rendant sur la Lune à ne pas endommager le matériel laissé par les missions Apollo. Les restrictions pourront être levées dans un but scientifique ou historique. **M. B.**



NASA-JPL/CALTECH

Le « Mars Dog » pourra s'introduire dans des endroits inaccessibles aux rovers.

Des chiens robots pourraient explorer les recoins de Mars

ESPACE Des quadrupèdes robotisés, autonomes, pourraient explorer un jour les zones les moins accessibles de Mars. Développés par la Nasa, les prototypes présentés lors du dernier congrès de l'Association américaine de géophysique sont équipés de lidars et de diverses caméras. **F. D.**

SOURCE : THOMAS TOUNA, JET PROPULSION LABORATORY. ÉTATS-UNIS.

LE TWEET DU MOIS

« Une vue imprenable de l'espace aujourd'hui »

BLUE ORIGIN

C'est ainsi que la société Blue Origin de Jeff Bezos, le fondateur d'Amazon, a salué le vol de la capsule New Shepard à 107 km d'altitude — soit au-delà des 100 km formant la frontière de l'espace selon la définition de la Fédération aéronautique internationale. Cette capsule, qui emportait des équipements destinés aux futurs vols habités, embarquait un mannequin baptisé Skywalker. **S. R.**

13,03 milliardsd'années-lumière

La distance de la Terre du quasar le plus éloigné connu

ASTROPHYSIQUE Le noyau de galaxie active J0313-1806 existait alors que l'Univers n'avait que 670 millions d'années, soit 5 % de son âge actuel. L'objet héberge un trou noir supermassif équivalent à la masse combinée de 1,6 milliard de Soleils et il est dix mille milliards de fois plus lumineux que notre étoile. **J. I.**

SOURCE : FEIGE WANG, UNIVERSITÉ DE L'ARIZONA, TUCSON, ÉTATS-UNIS.

L'œil de Lascar

CAPTEURS, COMMUNICATIONS, calculs et recherche fondamentale sont au cœur du « plan quantique » annoncé par le président de la République Emmanuel Macron le 21 janvier. Doté de 1,8 milliard d'euros sur cinq ans, il a l'ambition de placer la France au troisième rang mondial derrière les États-Unis et la Chine. **O. L.**

Partenariat
SCIENCES AVENIR

La nuit des temps 2021

Cette manifestation organisée par la Société française de physique, le CNRS et le CEA mobilise des scolaires autour du thème du temps (concours expérimentaux, littéraires artistiques et philosophiques) et propose le 10 mars une table ronde sur l'irréversibilité animée par Fabrice Nicot, journaliste à *Sciences et Avenir-La Recherche*.

programme : sciav.fr/889Nuitdestemps

QUESTIONS À

T. LOUIS

Thibaut Louis

Laboratoire de physique des 2 infinis-Irène Joliot Curie (IJCLab : CNRS-université Paris-Saclay, université de Paris)

La meilleure mesure de la constante de Hubble

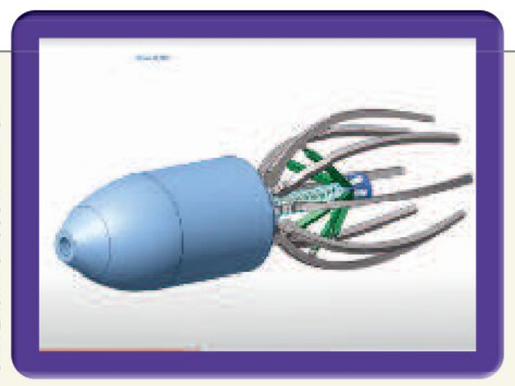
Grâce au télescope cosmologique d'Atacama (Chili), une équipe internationale publie une nouvelle mesure de la constante de Hubble, liée à l'expansion de l'Univers qui permet de définir la vitesse, et donc l'âge de l'Univers.

La constante de Hubble a fait l'objet de nombreuses mesures ces dernières années. Pourquoi en réaliser encore une ?
Les valeurs obtenues jusqu'ici ne concordent pas. Il y a deux approches. L'une, incarnée par le prix Nobel de physique 2011 Adam Riess, permet de l'estimer à 74 kilomètres par seconde par mégaparsec (km/s/Mpc) [sur une distance de 3,26 millions d'années-lumière, l'Univers grandit de 74 km toutes les secondes]. L'autre aboutit à 67,4 km/s/Mpc. Notre mesure, 67,9, concorde avec cette dernière.

Comment expliquer ce désaccord ?
Les méthodes de calcul diffèrent. Adam Riess utilise des supernovæ, ces explosions d'étoiles en fin de vie qui servent de jalons pour mesurer les distances dans l'Univers, et estimer son expansion. Dans le second cas, ce sont les mesures du satellite européen Planck en 2013 qui sont utilisées. Elles reposent sur l'étude du fond diffus cosmologique, la première lumière émise 380 000 ans après le Big Bang. Ce qui revient à regarder beaucoup plus loin dans le temps. Notre estimation se fonde aussi sur le fond diffus, mais mesuré depuis la Terre.

Le débat est-il clos ?
Sûrement pas. Notre résultat valide celui obtenu par Planck. Mais nous ne démontrons pas que l'approche d'Adam Riess est fausse. D'ailleurs, il faut espérer qu'elle ne l'est pas. Car si d'autres mesures venaient la conforter, alors c'est notre modèle de l'Univers qu'il faudrait revoir. Et ça, ce serait passionnant !

Propos recueillis par F. N.



UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON

À VOIR SUR LE NET

Ce robot mou imite les méduses

BIONIQUE Cet engin aquatique consiste en une membrane en cloche qui est tendue à intervalles réguliers par huit bras flexibles. Un système de pistons alimentés par une source électrique et de ressorts écarte ces bras et tend la membrane. Celle-ci se contracte ensuite pour revenir à son état initial, éjectant un jet d'eau qui propulse le robot en avant, comme le fait une méduse commune. **A. D.**
sciav.fr/889meduse

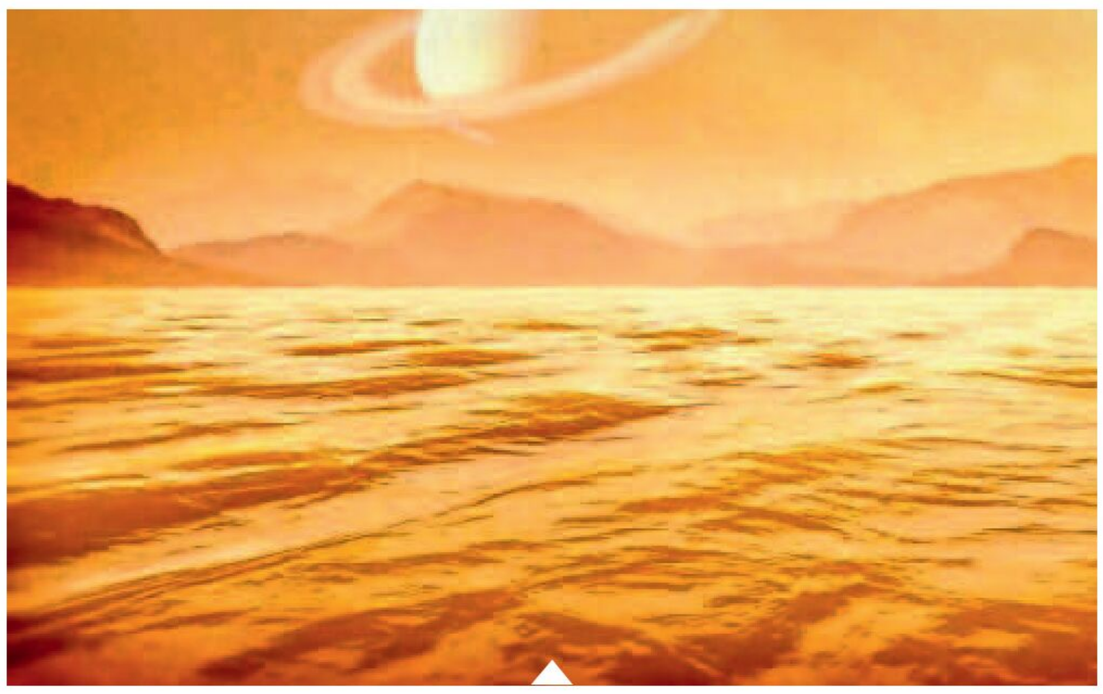
SOURCE : THIERRY BUJARD, UNIVERSITÉ DE SOUTHAMPTON, ROYAUME-UNI.

143 Le nombre record de satellites mis en orbite en un lancement

ASTRONAUTIQUE Le 24 janvier, le vol Transporter-1 de l'entreprise américaine SpaceX dirigée par Elon Musk a battu le record de satellites déployés en orbite basse (à 500 km d'altitude), détenu jusqu'alors par l'indien PSLV (Polar Satellite Launch Vehicle), avec 104 satellites lancés en 2017. Une performance qui menace la stratégie des petits lanceurs tels le Vega européen. Cette mission emportait notamment un nanosat français de l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines. **S. R.**

Une deuxième vie pour Juno

ESPACE La mission américaine Juno, qui scrute Jupiter depuis 2016, devait s'achever en juillet 2021. Mais la Nasa a annoncé qu'elle l'étendait jusqu'en 2025. Elle va maintenant explorer le système jovien complet : Jupiter et notamment ses régions polaires, son énigmatique Grande Tache bleue, une étrange zone équatoriale de magnétisme intense, ses anneaux dont, pour la première fois, les plus ténus, ainsi que ses lunes, particulièrement Ganymède, Europe et Io. **S. R.**



NASA/JOHN GLENN RESEARCH CENTER

L'étendue d'eau liquide, dont la surface équivaudrait à cinq Grands Lacs d'Amérique du Nord, pourrait avoir une profondeur de 300 m (vue d'artiste).

Titan recèle un lac profond de plusieurs centaines de mètres

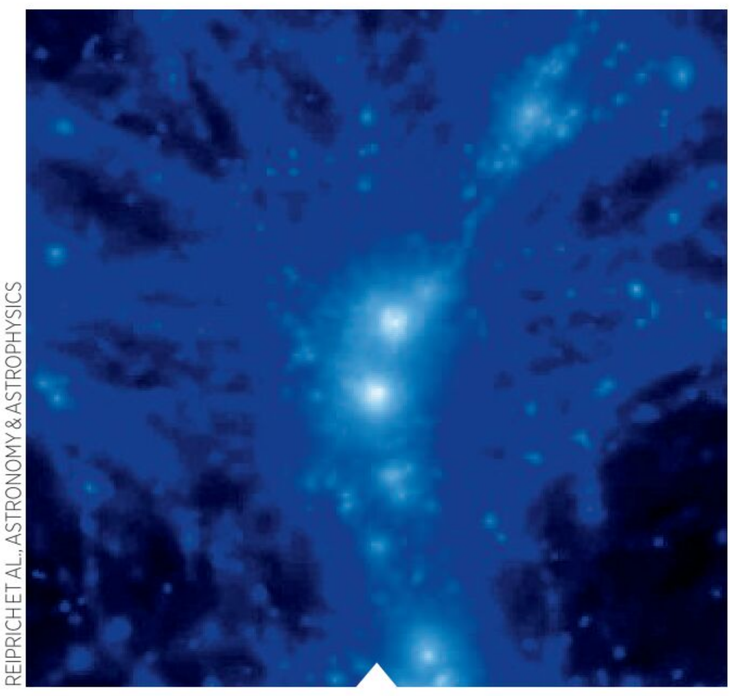
Situé sur la plus grosse lune de Saturne, il a été repéré par la mission Cassini-Huygens.

PLANÉTOLOGIE Kraken Mare, la plus vaste étendue de liquide à la surface de Titan (la plus grosse des lunes de Saturne), pourrait être profond de 300 mètres, contre 35 mètres d'après les estimations établies en 2014. C'est ce qu'avance un groupe de chercheurs du Centre d'astrophysique et des sciences planétaires de l'université Cornell (Ithaca, États-Unis), qui a analysé des données issues de l'un des derniers survols de Titan par la mission Cassini-Huygens, achevée il y a trois ans.

Le lac contiendrait environ 80 % de tous les liquides présents à la surface de l'astre. Composé d'hydrocarbures légers et d'azote, sa superficie représenterait l'équivalent des cinq Grands Lacs d'Amérique du Nord — ce qui permet de comprendre pourquoi Kraken Mare est ainsi appelé (de *mare*, mer en latin). La profondeur a été estimée en déterminant le temps nécessaire au signal radar émis par Cassini pour rebondir sur la surface du liquide et sur le fond de la mer alors qu'elle se trouvait à environ 965 kilomètres de sa surface. **M. B.**

Le plus long filament intergalactique

ASTROPHYSIQUE Cinquante millions d'années-lumière : voilà la longueur du plus long filament intergalactique jamais observé. Ces filaments sont d'immenses structures qui traversent et façonnent l'Univers, reliant les amas de galaxies entre eux. Le géant a été observé grâce au télescope eRosita qui observe le ciel dans les rayons X avec une optique à large champ capable d'enregistrer l'infime rayonnement qui émane du gaz dans les filaments. Il relie trois amas de galaxies qui forment le système Abell 3391/95. **J. I.**



REIPRICH ET AL., ASTRONOMY & ASTROPHYSICS

Simulation de la distribution des gaz chauds dans le filament qui relie les 3 amas de galaxies du système Abell 3391/95 observé par eRosita.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

institutCurie

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

curie.fr

Ensemble, prenons le cancer de vitesse.

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institutCurie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compéter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

sa052019

FRANCOIS HENRY/REA

Le manque de pluie hors période hivernale et la chaleur vont mettre à mal les cultures.

Le terrible bulletin de Météo France pour 2100

Si rien n'est fait, les températures auront augmenté de 5 °C à la fin du siècle avec des canicules s'étalant sur deux mois.

CLIMATOLOGIE L'été sera de plus en plus chaud, l'hiver de plus en plus doux. Les dernières projections de Météo France sur le climat en 2100 sont alarmantes. Si les émissions de gaz à effet de serre ne diminuent pas fortement, les températures moyennes seront supérieures de 5 °C à celles d'aujourd'hui. Les canicules semblables à celle de 2003 dureront alors deux mois avec des pics de chaleur autour de 50 °C. Les hivers, très doux, seront arrosés par des pluies importantes. Pluies qui seront absentes le reste de l'année. Ce travail est en outre corroboré par l'exercice mené par Aurélien Ribes, chercheur à Météo France, qui a réussi à agréger les mesures effectuées par les thermomètres depuis 1850 aux modèles utilisés pour construire les simulations du climat du futur. Cette méthode donne une hausse des températures moyennes de 1850 à 2020 de 1,22 °C, supérieure aux estimations du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Conclusion : l'objectif de limitation à 1,5 °C de la hausse des températures fixé par l'accord de Paris de 2015 ne sera vraisemblablement pas respecté. Plus que jamais, préviennent les climatologues, la lutte contre les émissions de CO_2 doit s'intensifier. **L. C.**

Quand un herbicide fait ressurgir un insecticide

AGRONOMIE Bien qu'interdit depuis 1993, le chlordécone refait surface aux Antilles. En cause : l'usage du glyphosate. Répandu massivement depuis 2000, l'herbicide favorise l'érosion des sols et fait migrer dans les rivières et l'océan les résidus de cet insecticide nocif pour la santé humaine. L'analyse de sédiments marins sur deux sites martiniquais et guadeloupéen montre des teneurs en chlordécone multipliées par 10 depuis 2000. **L. C.**

SOURCE : PIERRE SABATIER, UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES.

JONATHAN WHITNEY, JOEY LECKY/NOAA FISHERIES

Des juvéniles de poissons et d'invertébrés se nourrissent dans les « rivières » de surface circulant au large de Hawaii.

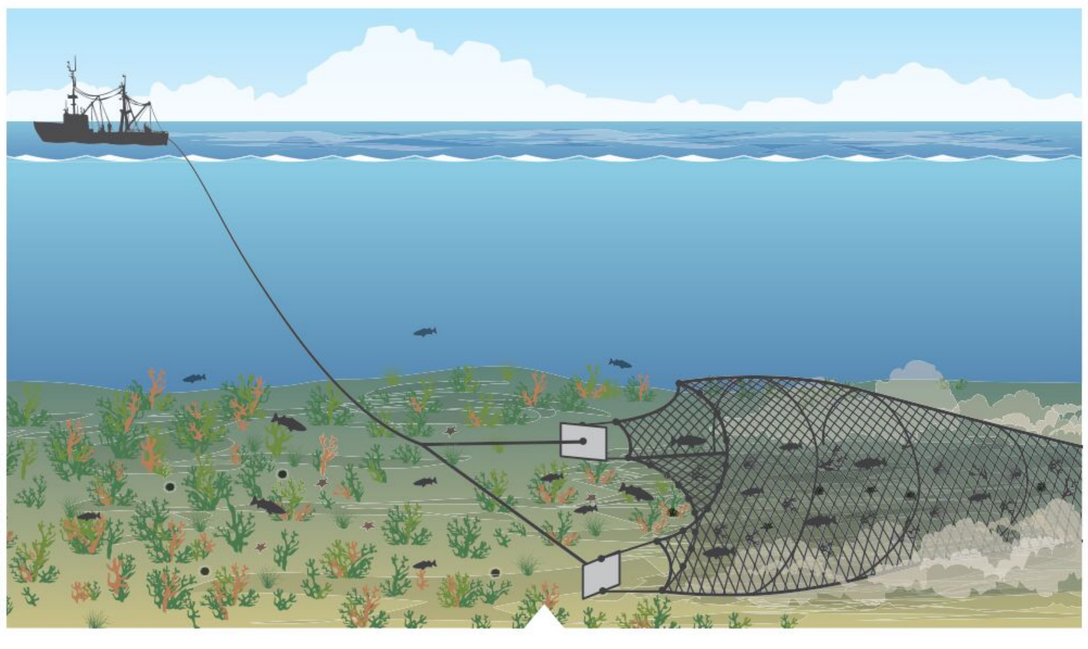
Des autoroutes océaniques pour les larves de poissons

ICHTYOLOGIE Un mystère est levé : c'est sous les couches superficielles de l'océan que se cachent les larves de poissons après leur éclosion. Ils y trouvent des rubans sinueux d'eaux lisses, où se concentrent également le plancton (leur nourriture) et des débris flottants qui les dissimulent.
Ces rubans fonctionneraient comme une autoroute reliant les nurseries à leur destination finale. **S. R.**

SOURCE : JONATHAN WHITNEY, UNIVERSITÉ D'HAWAII, MANOA.

Vers la fin du chalutage de fond

OCÉANOLOGIE C'est une première en Europe : les autorités britanniques ont annoncé le 2 février l'interdiction totale des chaluts de fond dans deux importantes aires de reproduction des poissons en mer du Nord, le banc de sable Dogger Bank et la zone South Dorset. Ces zones étaient protégées mais non surveillées et donc empruntées par les chalutiers. **L. C.**



BRUNO BOURGEOIS

Les chaluts ne pourront plus racler le fond de la mer et les aires où les poissons déposent leurs œufs seront ainsi préservées.

IL A DIT

« 100 % d'énergie renouvelable en 2050, c'est possible »

Xavier Piechaczyk, président du gestionnaire des réseaux électriques haute tension RTE, à l'occasion d'un rapport sur le sujet publié conjointement avec l'Agence internationale de l'énergie, qui pointe notamment que le caractère intermittent du solaire et de l'éolien peut être compensé par le stockage.

Réveillez

l'explorateur

qui est en vous !

World Explorer

Ultramarine

Quark Expeditions®

The Leader in Polar Adventures

BLEU INFINI
Voyages de caractère

Renseignements et réservations Bleu Infini :
04 72 76 75 66 | www.bleu-infini.fr

Embarquez pour le voyage d'une vie à la découverte de l'Antarctique avec Bleu Infini & Quark Expeditions !

L'Antarctique inspire les explorateurs depuis des siècles, maintenant c'est à votre tour de découvrir les merveilles du continent blanc.

Rejoignez l'une de nos expéditions francophones :

- Antarctique Terre Extrême :
  du 18 Novembre au 2 Décembre 2021 ou 5 au 19 Janvier 2022
- Voyage spécial éclipse solaire en Antarctique et Géorgie du Sud :
  du 24 Novembre au 14 Décembre 2021

E.J.BARTOLAZO

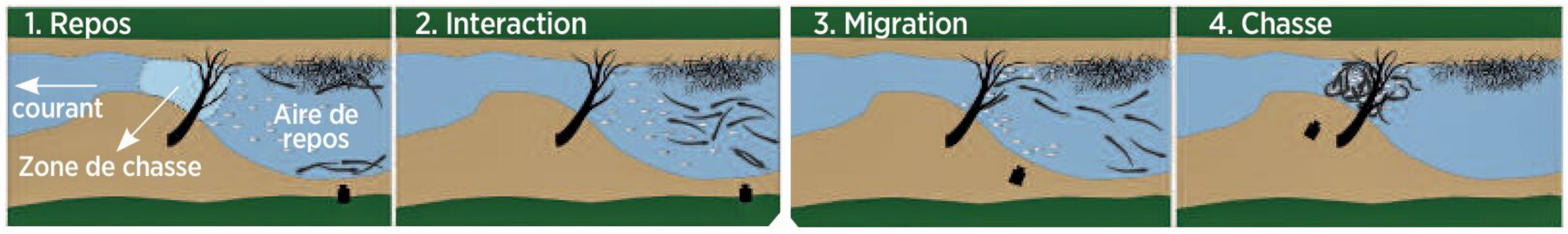
Le harfang, surpris ici à Central Park, vit habituellement en Arctique.

L'IMAGE DU MOIS

Le « hibou de Harry Potter » réapparaît à New York

ORNITHOLOGIE Un magnifique harfang des neiges — de la même espèce que le rapace offert à Harry Potter dans le cycle romanesque qui porte son nom — s'est posé le 27 janvier dans Central Park, à New York. Une première depuis 1890 selon Paul Sweet, un ornithologue du Muséum américain d'histoire naturelle. Ces oiseaux résident autour du pôle Nord. S'ils volent vers le sud en hiver, leur trajet s'arrête généralement plus près de la frontière américano-canadienne. **A.-S. T.**

Des anguilles s'unissent pour lancer des attaques électriques



DOUGLAS ABASTOS ET AL.

En agissant en groupe, les anguilles peuvent produire un courant électrique dévastateur pour tout un banc de poissons.

ÉTHOLOGIE Lors d'une attaque, un groupe de 10 anguilles électriques de Volta pourrait générer un courant de 8600 volts, *« soit la tension nécessaire pour alimenter environ 100 ampoules »,* selon David de Santana, un chercheur brésilien. Celui-ci a découvert que ce poisson, dont la décharge peut atteindre 860 V — un record —, est capable, en interagissant avec ses congénères, de décupler cette tension pour dévaster des bancs de petits poissons. **A.-S. T.**

SOURCE : DOUGLAS ABASTOS INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA, MANAUS, BRÉSIL.

À VOIR SUR LE NET

THOMAS SEIBERT

Ce serpent grimpe au lasso

HERPÉTOLOGIE Des chercheurs ont découvert un mode de déplacement jamais observé juste-là chez les serpents bruns arboricoles de l'île de Guam (Océanie) : la « locomotion au lasso ». En se nouant sur un support, le reptile forme une boucle qui lui offre un point de préhension fort et unique. Il ne lui reste plus qu'à contracter ses muscles afin de se propulser vers le haut. **A.-S. T.**

SOURCE : JULIE SAVIDGE, COLORADO STATE UNIVERSITY, FORT COLLINS, ÉTATS-UNIS.

Les araignées cousent des feuilles et piègent les grenouilles

Les bords des deux feuilles sont assemblés par des fils de soie.

ARACHNOLOGIE Ce serait une première chez les araignées : un piège construit spécifiquement pour capturer des vertébrés. Des scientifiques de l'université d'Antananarivo, à Madagascar, ont observé des arachnides se repaissant de grenouilles *Heterixalus andrakata* au sein d'un abri constitué de deux feuilles aux bords reliés par des fils de soie. Un abri permettant aux amphibiens de se protéger du soleil pour éviter la déshydratation mais synonymes de pièges mortels. La grande araignée chasseuse

DOMINIC MARTIN

Frais et sombre, l'abri de feuilles attire les grenouilles, qui se retrouvent à la merci des chasseuses.

Damastes a ainsi été surprise dans le nord-est de Madagascar dans plusieurs repaires de feuilles cousues, sur des arbres d'espèces différentes. *« En attachant les feuilles ensemble, elle crée des microhabitats frais et sombres, très attrayants dans un environnement sec et brûlant où rôdent beaucoup d'oiseaux prédateurs »*, explique Thio Rosin Fulgence, auteur d'une nouvelle publication sur le sujet dans la revue *Ecology and Evolution*. Reste à prouver que ces pièges sont intentionnels. **R. M.**

ENGAGEMENT
#5

A vos questions, VRAI répond par ses engagements.

Cet été, VRAI a lancé une grande consultation auprès des Français. Tant de questions, de réflexions et d'attentes ! Voilà qui nous a encore plus stimulés. Très vite, nous avons mis en place des ateliers où collaborateurs, producteurs et consommateurs ont échangé, discuté et créé durant des mois. Aujourd'hui, nous vous annonçons la naissance de notre Charte d'Engagements. Des actions concrètes améliorant nos produits, la santé de la planète et la vôtre.

Produire en France ! Avec 93% de nos ingrédients d'origine France et 100% de fabrication française.

AB AGRICULTURE BIOLOGIQUE

DÉCOUVREZ TOUS NOS ENGAGEMENTS SUR **VRAI.FR**
#LESVRAIESREPONSES

Vrai C'EST MA NATURE

Pour votre santé, évitez de manger trop gras, trop sucré, trop salé. www.mangerbouger.fr

Les groupes sanguins A, B et AB protégeraient de maladies intestinales

Les sucres présents sur les globules rouges influenceraient la population de certaines bactéries.

GASTRO-ENTÉROLOGIE Le groupe sanguin pourrait jouer un rôle bénéfique dans les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (MICI) en favorisant certaines bactéries intestinales protectrices, d'après une étude allemande conduite à l'université de Kiel. Les scientifiques ont examiné le génome de presque 9000 personnes, ainsi que leurs selles — révélant les populations bactériennes intestinales. Résultat, 38 séquences génétiques sont apparues associées à la composition du microbiote, dont une en relation avec le groupe sanguin. Il existe ainsi un lien entre les groupes A, B et AB, la présence de bactéries de la famille *Bacteroides*, et une protection contre les MICI. Sans démontrer de causalité, ces résultats « *suggèrent clairement que les groupes sanguins et le microbiote sont liés* », explique Malte Rühlemann, premier auteur. L'explication pourrait se trouver dans les sucres présents sur les globules rouges, qui diffèrent selon les groupes sanguins A, B, AB et O, et que l'on retrouve dans les sécrétions intestinales de 80 % des personnes. Ils pourraient en effet servir de source d'énergie pour certaines bactéries intestinales. **C. G.**

SPL/PHANIE

Le développement de bactéries intestinales protectrices pourrait être favorisé par certains groupes sanguins.

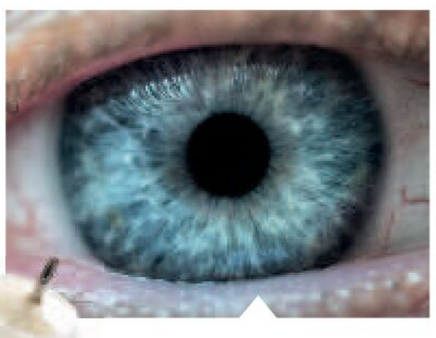
EN DEUX MOTS

ENFANTS MYOPES. Le nombre d'enfants atteints de myopie à 6 ans a plus que triplé à Feicheng, ville du nord-est de la Chine, après 4 mois de confinement et de manque de la lumière naturelle. **CŒUR ET POLLUTION.** Une étude conduite par des médecins chinois réaffirme l'existence d'un lien entre l'exposition aux particules fines inférieures à 2,5 µm et le risque de décès par infarctus du myocarde. **AVC.** Des chercheurs suédois ont identifié une nouvelle mutation génétique associée à un risque d'accident vasculaire cérébral.

Des signes précurseurs d'Alzheimer dans l'urine

COGNITION L'analyse d'un échantillon d'urine permettrait de déterminer si de légers troubles neurocognitifs annoncent (ou non) le début d'une maladie d'Alzheimer. En analysant des marqueurs métaboliques urinaires chez plus de 500 patients et en les recoupant avec des marqueurs génétiques, des médecins ont identifié un profil caractéristique des patients les plus à risque. **P. K.**

SOURCE : N. KURBATOVA, EUROPEAN MOLECULAR BIOLOGY LABORATORY, ROYAUME-UNI.



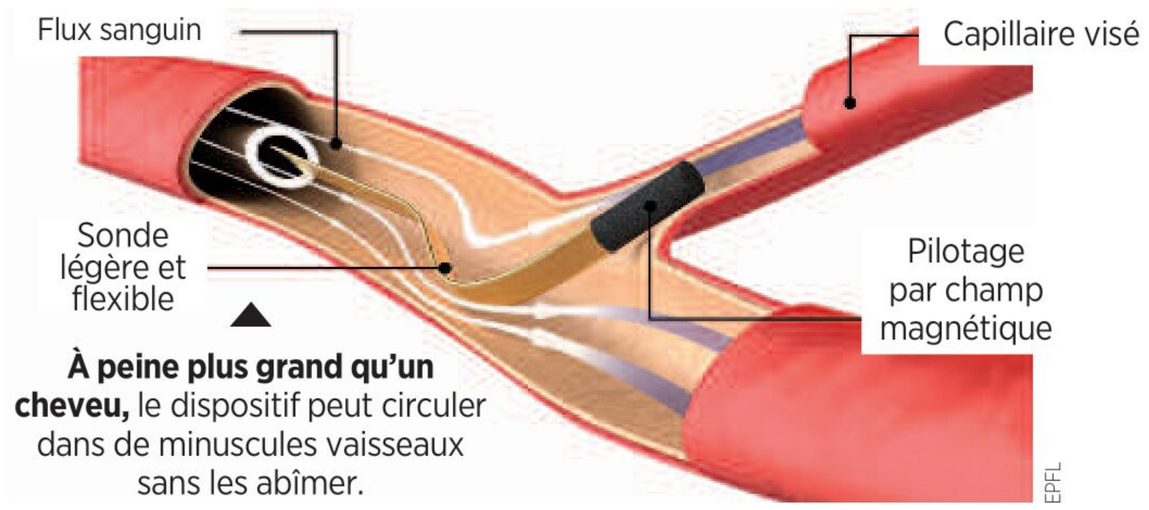
ROB FELT, GARY MEEK/GEORGIA TECH

Administré grâce à une microaiguille, le gel pourrait faire baisser la pression interne de l'œil.

Un gel pour traiter le glaucome

OPHTALMOLOGIE Une équipe américaine est parvenue chez l'animal à démontrer qu'un hydrogel administré localement permettait d'absorber l'excès d'un liquide responsable de la pression sur le nerf optique, entraînant un glaucome. **S. R.-M.**

SOURCE : J. JEREMY CHAE, GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ATLANTA, ÉTATS-UNIS.



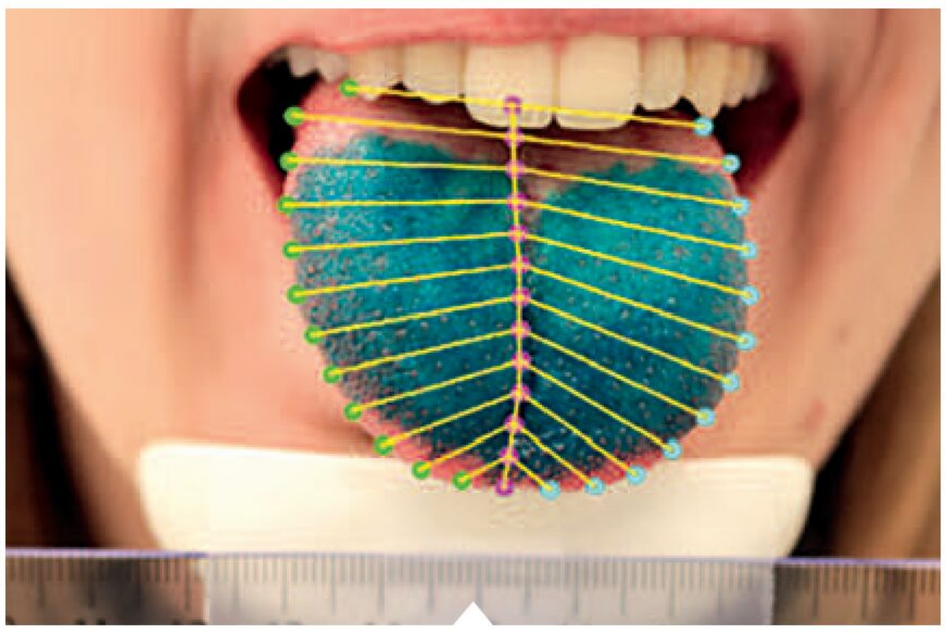
EPFL

À peine plus grand qu'un cheveu, le dispositif peut circuler dans de minuscules vaisseaux sans les abîmer.

Un microrobot téléguidé explore les capillaires

CHIRURGIE **Des travaux menés chez le lapin viennent de démontrer le potentiel d'un robot chirurgical à peine plus grand qu'un cheveu humain pour naviguer à l'intérieur des plus fins capillaires du corps. Les chercheurs ont eu l'idée de coupler l'énergie mécanique du sang résultant du mouvement du liquide à un téléguidage réalisé à distance par un champ magnétique. S. R.-M.**

SOURCE : LUCIO PANCALDI, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, SUISSE.



UNIVERSITY OF COPENHAGEN

Les papilles gustatives des Chinois sont plus sensibles à l'amertume des aliments que celles des Danois.

La génétique conditionne les préférences alimentaires

PERCEPTION Les préférences de textures et de goûts dépendent de la culture, mais aussi de la génétique. Des scientifiques ont observé la répartition des papilles gustatives sur les langues de 76 Danois et d'autant de Chinois grâce à un algorithme. Résultat, il y aurait plus de papilles gustatives sur les langues chinoises que sur les danoises, les rendant plus sensibles à l'amertume des aliments. **C. G.**

SOURCE : CHENHAO WANG, UNIVERSITÉ DE COPENHAGUE, COPENHAGUE, DANEMARK.

PHANIE

Le surdosage chez les jeunes enfants peut être dangereux pour leurs reins.

Attention à la vitamine D

PÉDIATRIE À la suite de cas de surdosage chez de jeunes enfants, l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) appelle à bien contrôler les doses de vitamine D prescrite en prévention du rachitisme. Car si cette vitamine est indispensable à la croissance des os, elle peut être dangereuse pour les reins. L'ANSM déconseille les compléments alimentaires, qui peuvent être non conformes et surdosés. **S. R.-M.**

Ebola perdure chez les survivants

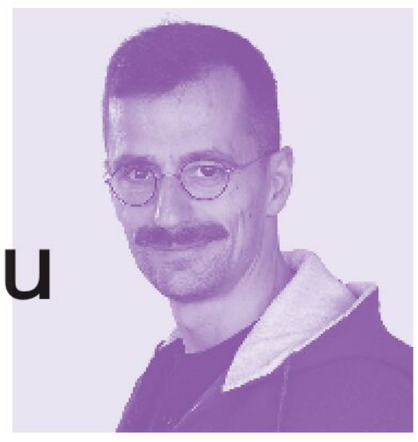
VIROLOGIE La moitié des personnes ayant survécu à l'infection par le virus Ebola lors de l'épidémie de 2014-2016 porteraient encore le virus en eux. Pour parvenir à ce résultat, des médecins ont mesuré le taux d'anticorps chez 51 survivants : ils ont observé une résurgence des agents immunitaires chez 39 d'entre eux. Ce qui pourrait signifier que le virus a les capacités de demeurer caché dans l'organisme et pourrait donc ressurgir. H. R.

SOURCE : CHARLENE ADAKEN, UNIVERSITÉ DE LIVERPOOL, ROYAUME-UNI.

ALAIN TENDERO/DIVERGENCE-IMAGES.COM

Sur 51 survivants à une infection par le virus Ebola dont le taux d'anticorps a été mesuré, 39 seraient encore porteurs du virus.

Nous sommes composés de 65% d'eau et de 35 % de questions.



© Radio France/Ch. Abramowitz

LA MÉTHODE SCIENTIFIQUE
DU LUNDI AU VENDREDI 16H00

NICOLAS MARTIN

franceculture.fr/ @Franceculture

En partenariat avec SCIENCES ET AVENIR La Recherche

france culture
L'esprit d'ouverture.

L'APPLI DU MOIS

Un robot psy dans son smartphone

PSYCHOLOGIE L'application Mon Sherpa vient de recevoir le prix du comité scientifique du congrès français de psychiatrie l'Encéphale. Créée par des psychiatres, et actuellement gratuite, elle propose un accompagnement psychologique grâce à un robot conversationnel. Sans remplacer le thérapeute, elle ambitionne de faire le lien entre deux séances. **S. R.-M.**
monsherpa.io

SHUTTERSTOCK-MONSHERPA

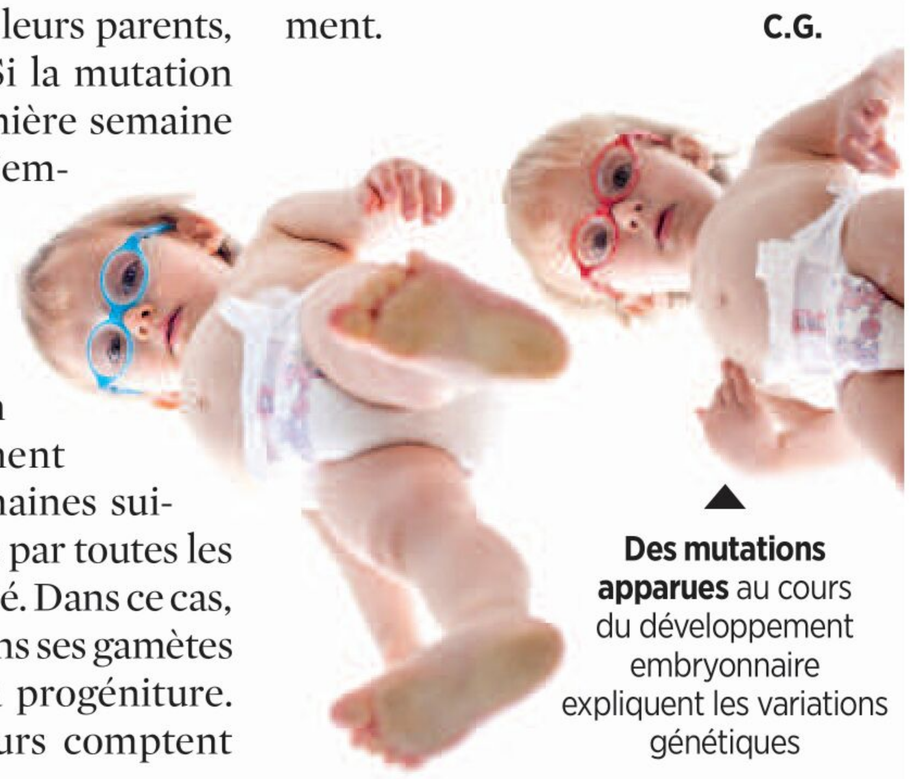
Mon Sherpa permet un accompagnement psychologique entre deux séances.

Tous les vrais jumeaux n'ont pas le même ADN

Cette découverte pourrait expliquer certains troubles neurologiques affectant un des jumeaux et pas l'autre.

GÉNÉTIQUE 15 % des paires de vrais jumeaux ont un patrimoine génétique différent qui peut être transmis à la descendance, ont démontrée, ont démontré des scientifiques de l'université d'Islande à Reykjavik. Pour arriver à ce résultat, ils ont comparé les génomes de 387 paires de vrais jumeaux avec ceux de leurs parents, conjoints et enfants. Si la mutation survient après la première semaine de gestation, lorsque l'embryon s'est déjà divisé en deux, alors les jumeaux diffèrent génétiquement. De plus, si cette mutation se produit suffisamment tôt, dans les deux semaines suivantes, elle sera portée par toutes les cellules du jumeau muté. Dans ce cas, elle apparaîtra aussi dans ses gamètes et sera transmise à sa progéniture. Résultat, les chercheurs comptent en moyenne cinq mutations séparant les jumeaux, mais elles ne sont transmises que dans 15 % des paires. Cette découverte pourrait expliquer certains cas d'autisme ou de troubles neuro-développementaux chez un des jumeaux et pas l'autre, jusque-là attribués à des effets de l'environnement. **C.G.**

PLAINPICTURE



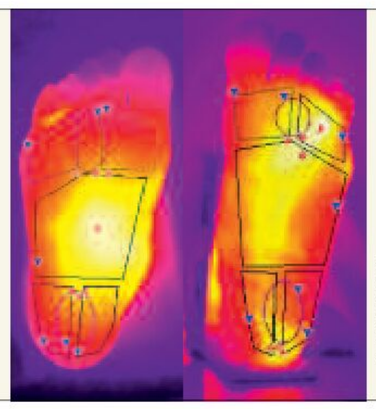
Des mutations apparues au cours du développement embryonnaire expliquent les variations génétiques

30 à 40 minutes

Le temps de sport nécessaire pour compenser 10 heures passées assis

PHYSIOLOGIE D'après des scientifiques norvégiens, maintenir ce niveau *« d'activité physique d'intensité modérée à vigoureuse »* permet de conserver une espérance de vie similaire à celle des personnes peu sédentaires. **C. L.**

SOURCE : ULF EKELUND, ÉCOLE NORVÉGIENNE DES SCIENCES DU SPORT, OSLO (NORVÈGE)



A. GATT ET AL

▶ **Le pied** du malade (à droite) a un profil thermique différent.

La chaleur, nouveau marqueur de la polyarthrite rhumatoïde

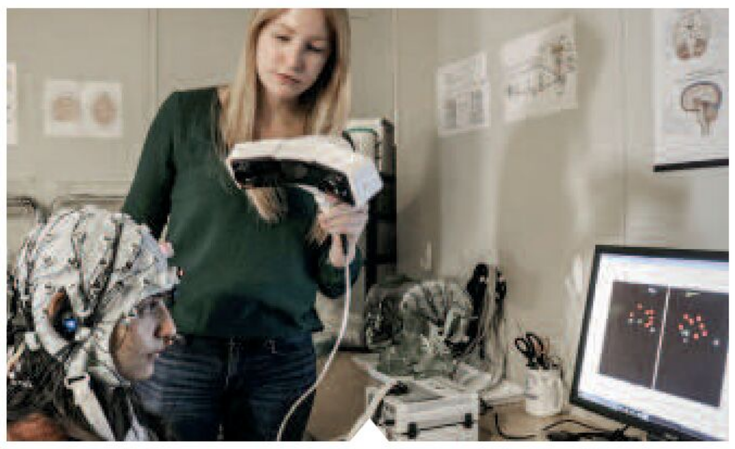
RHUMATOLOGIE Mesurer le rayonnement thermique infrarouge des pieds : une équipe britannique propose de recourir à cette technique indolore pour examiner les patients atteints de polyarthrite rhumatoïde et suivre l'évolution de la maladie qui oscille entre poussées et phases de rémission. **S. R.-M.**

SOURCE : ALFRED GATT, UNIVERSITÉ DE MALTE.

La stimulation électrique du cerveau réduit les TOC

NEUROLOGIE Des symptômes de troubles obsessionnels compulsifs ont été atténués chez des patients pendant trois mois après application à l'avant du crâne d'un faible courant alternatif durant une demi-heure sur cinq jours. Personnalisé, le traitement reproduit les ondes cérébrales du patient à la suite d'un apprentissage réussi. **P. K.**

SOURCE : SHREY GROVER, UNIVERSITÉ DE BOSTON, ÉTATS-UNIS.



BOSTON UNIVERSITY

Le traitement consiste à appliquer un faible courant alternatif à l'avant du crâne.

Microbiote et anorexie, le cercle vicieux

PSYCHOPATHOLOGIE Les personnes anorexiques possèdent des flores bactériennes moins diverses et abondantes, c'est-à-dire un microbiote favorisant leur pathologie. C'est un véritable cercle vicieux qui vient d'être mis en évidence dans une métaétude britannique : un mauvais comportement alimentaire dérègle le microbiote et ce dérèglement conduit à des troubles alimentaires. **H. R.**

SOURCE : ANA GHENCIULESCU, UNIVERSITÉ D'OXFORD, ROYAUME-UNI.

PUBLICITÉ

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

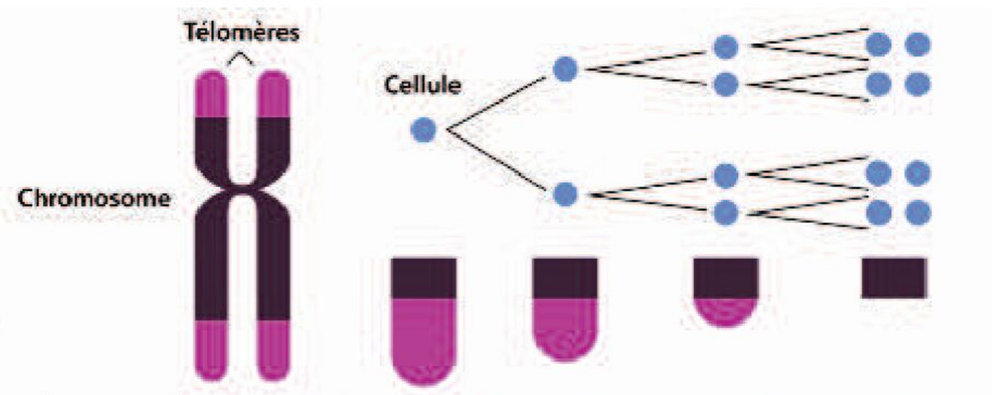
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

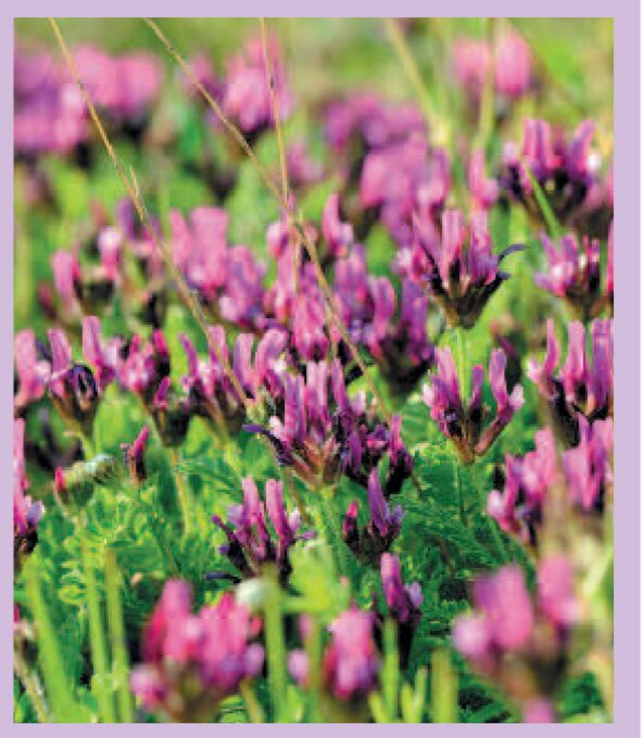
Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence.

Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales.

Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifiques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffisent pour constater une diminution significative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.



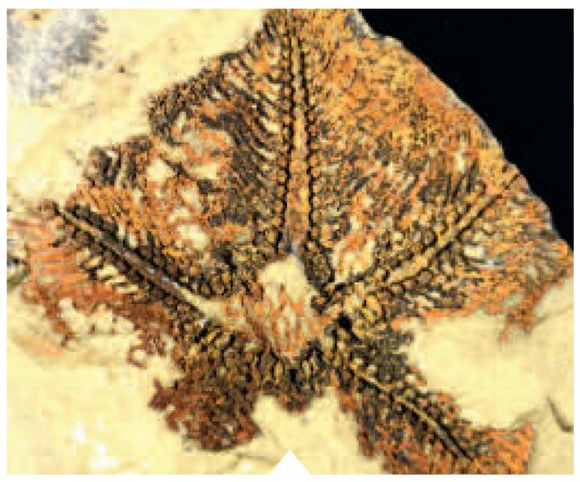
Disponible en pharmacie et espace diététique

Telomerys
60 gélules végétales
ACL 6024256
Des questions ?
Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au 01 85 41 32 63 (tarif local) et sur **www.telomerys.com**.

Un fossile de 480 millions d'années proche d'une étoile de mer

PALÉONTOLOGIE Un étrange animal vient d'être exhumé dans les montagnes marocaines : le fossile de *Cantabrigiaster fezouataensis*, un échinoderme qui possède des caractéristiques communes aux étoiles de mers et aux crinoïdes (lys de mer) actuels. Il serait vieux de 480 millions d'années. Déjà doté d'une symétrie d'ordre 5, avec 5 bras pas entièrement détachés du reste du corps, il pourrait permettre de mieux comprendre l'évolution de ce groupe. **J. I.**

SOURCE : AARON HUNTER, UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE, ROYAUME-UNI.



CLAUDE BERNARD UNIVERSITÉ LYON 1

Le fossile de « Cantabrigiaster fezouataensis » a été mis au jour dans l'Anti-Atlas, au Maroc.

Des paléomonnaies de l'âge du bronze

Présentant un poids standardisé, certains objets auraient joué le rôle de monnaie.

Ces bagues découvertes en République tchèque présentent des différences de poids imperceptibles en les soupesant à la main.

HELENA MOTYCKOVA

NUMISMATIQUE Une forme de monnaie primitive vieille de 3500 ans : voilà ce qu'auraient été ces objets en bronze aux poids standardisés. Des chercheurs du Laboratoire de préhistoire européenne de l'université de Leyde (Pays-Bas) estiment que la production en série de certains objets au début de l'âge du bronze (2150 et 1700 avant J.-C.) indiquerait un système précoce de monnaie, c'est-à-dire d'instruments d'échange normalisés. Ils ont notamment comparé plus de 5000 « haches à douille » et barres de bronze recueillies sur 113 sites européens. « *Le poids était crucial pour la détermination de la valeur des marchandises dans la plupart des transactions économiques* », expliquent les auteurs. Or la plupart de ces objets ont justement « *des masses si proches (195,5 g), qu'elles auraient été impossibles à distinguer à la main* ». L'analyse a été faite en s'appuyant sur la loi de Weber-Fechner, qui établit un lien entre le stimulus provoqué par la manipulation d'un objet et la sensation mentale qui en découle : le poids réel importe peu, seul compte le poids perçu. **B. A.**

-250 millions d'années

La date estimée de l'apparition des fleurs

ÉVOLUTION Un « abominable problème » : c'est ainsi que Charles Darwin considérait l'apparition des plantes à fleurs, faute de pouvoir expliquer leur soudaine explosion dans les archives fossiles, il y a 130 millions d'années. Mais une nouvelle modélisation à partir des données génétiques de 15 000 fossiles indique qu'elles existaient déjà 120 millions d'années plus tôt. **J. I.**

SOURCE : DANIELE SILVESTRO, UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE.

◀ **Ce bronze** daté du XIe siècle va retourner au Cambodge.

MATTHEW HOLLOW/ROYAL GOVERNMENT OF CAMBODIA

Le Cambodge récupère une collection privée d'art khmer

PATRIMOINE Le plus grand collectionneur d'antiquités khmères au monde, Douglas Latchford, avait légué à sa mort 125 statues, certaines vieilles de 1000 ans, à sa fille. Valeur : 50 millions de dollars. Celle-ci vient de décider de les restituer au Cambodge. Un choix sans doute motivé par le fait que son père, érudit reconnu, avait été accusé de trafic d'œuvres pillées. **B. A.**

Ces vertèbres appartiendraient au plus gros dinosaure connu

Les os du sauropode géant sont peu à peu dégagés dans la vallée de la Neuquén, en Argentine.

JOSE LUIS CARBALLIDO/CTYS-UNLAM/AFP

PALÉONTOLOGIE Long de plus de 40 mètres et pesant 70 tonnes, un dinosaure vieux de 98 millions d'années pourrait être le plus gros jamais découvert, d'après l'analyse de 24 vertèbres de la queue. Ses restes sont en cours de mise au jour depuis 2012 dans la vallée de la rivière Neuquén, en Patagonie argentine. La confirmation de son gigantisme ne pourra venir que de la découverte d'os longs comme le fémur ou l'humérus. **J. I.**

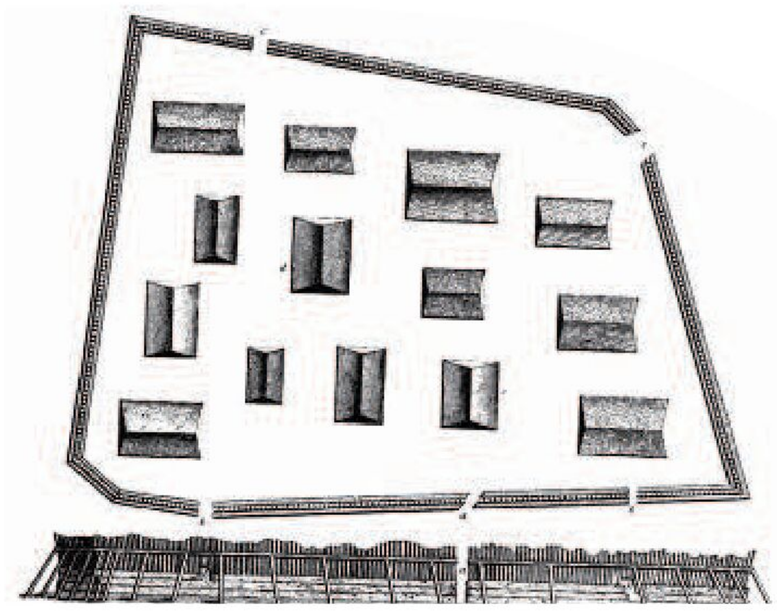
SOURCE : ALEJANDRO OTERO, CONSEIL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, BUENOS AIRES, ARGENTINE.

MAXPPP

Une partie du dépôt celtique de Sin-le-Noble (Nord) a été dérobée.

Cambriolage au musée archéologique de Douai

PATRIMOINE Un important vol a eu lieu dans la nuit du 20 au 21 janvier au musée archéologique Arkéos, de Douaisis Agglo, l'agglomération de Douai (Nord). Des monnaies d'or provenant du dépôt celtique de Sin-le-Noble (Nord) ont notamment été dérobées. Elles appartenaient au musée de la Chartreuse de Douai et avaient été prêtées provisoirement au musée Arkéos. Des armes, des monnaies mérovingiennes ainsi que du mobilier funéraire gaulois ont également été emportés. **B. A.**



NATIONAL PARK SERVICE

Construit par un peuple autochtone d'Alaska, le fort a été détruit par les colons russes en 1804 (ici un plan de l'ouvrage réalisé juste après la bataille).

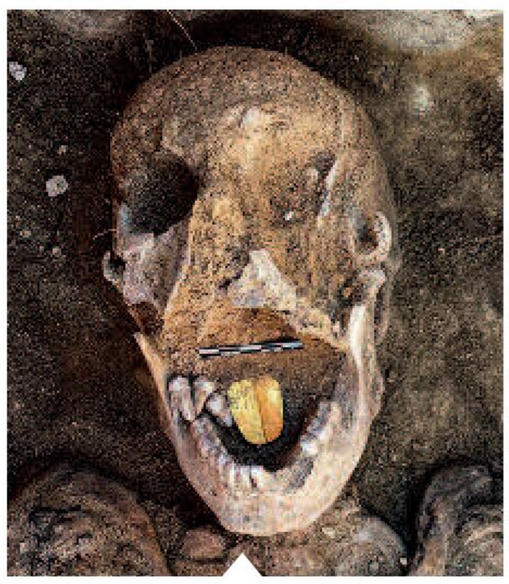
Les traces d'un fort découvertes en Alaska

ARCHÉOLOGIE En couplant deux techniques de pointe de prospection géophysique, des chercheurs ont réussi à retrouver en Alaska les traces d'un fort en bois détruit par les colons russes en 1804. Il avait été bâti par les Tlingits, peuple autochtone, puis abandonné après avoir été détruit. Son emplacement échappait aux archéologues depuis 100 ans. **A.-S. T.**

SOURCE : THOMAS URBAN, UNIVERSITÉ CORNELL, ITHACA, ÉTATS-UNIS.

Une langue d'or dans la bouche

ÉGYPTOLOGIE Une momie pourvue d'une langue d'or, peut-être posée pour aider le défunt à s'adresser aux dieux : c'est l'un des nombreux trésors découverts dans 16 sépultures aménagées dans un sanctuaire gréco-romain sur le site de Taposiris Magna, à l'ouest d'Alexandrie (Égypte). L'équipe de l'égyptologue dominicaine Kathleen Martinez a aussi mis au jour huit belles têtes de marbre, des masques funéraires et plusieurs autres momies. **B. A.**



EGYPTIAN MINISTRY OF ANTIQUITIES/AFP

La momie, datée d'il y a 2000 ans, a été retrouvée dans un temple de Taposiris Magna (Égypte).

www.sciencesetavenir.fr
www.larecherche.fr
Sciences et Avenir et *La Recherche*
au quotidien

PALÉONTOLOGIE

« J'aimerais que la paléogénétique aille au-delà de l'étude de l'ADN ancien »

L'essor de la paléogénétique depuis 30 ans est aussi celui des technologies de séquençage de l'ADN. Ludovic Orlando, de l'université Paul-Sabatier à Toulouse, le raconte dans *L'ADN fossile, une machine à remonter le temps* (Odile Jacob, 2021; voir p. 86) : son entretien est à lire sur **La Recherche** http://bit.ly/3ddOhvb

V. STEGER/SCIENCE PHOTO LIBRARY

INFORMATIQUE

« L'industrie » de la cybercriminalité

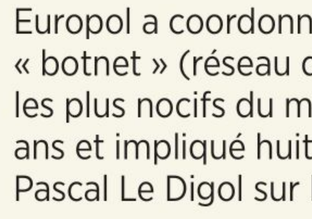
Europol a coordonné une action pour démanteler l'un des « botnet » (réseau de programmes informatiques malveillants) les plus nocifs du monde cybercriminel. L'enquête a duré deux ans et impliqué huit pays. Entretien avec l'expert en cybersécurité Pascal Le Digol sur le site de SCIENCES AVENIR **sciav.fr/Cyber889**

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Animaux. Les hippopotames d'Escobar

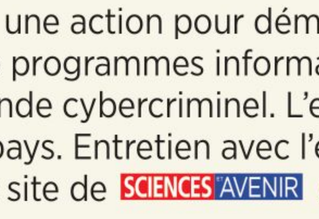


BIOSPHOTO

Ces anciens pensionnaires du zoo privé du trafiquant de drogue se sont, à sa mort, multipliés dans la nature. Une présence envahissante qui suscite un débat en Colombie.
sciav.fr/Hippos889

10 minutes

Archéologie. « The Dig » sur Netflix



NETFLIX

Ce film a pour thème l'incroyable découverte du navire-tombe de Sutton Hoo au Royaume-Uni. Elle a bouleversé ce que l'on savait du Haut Moyen Âge britannique.
sciav.fr/Dig889

15 minutes

Politique. États-Unis, le retour de la science

SIPA

Le 46e président a fait du Pr Eric Lander (Harvard, MIT) son conseiller pour la science et la technologie, des thématiques qu'il veut ériger en marqueurs de sa politique.
sciav.fr/Biden889

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Les promesses de L'HYDROGÈNE

La France investit des milliards d'euros pour développer la filière hydrogène qui permettra de disposer d'une source d'énergie non polluante pour les transports et l'industrie. Mais les freins demeurent nombreux : contraintes de stockage et de distribution, sécurité, défis de production d'un hydrogène « vert »...

L'Airbus ZEROe Blended Wing Body (à fuselage intégré) est un des trois projets d'avion commercial à hydrogène du constructeur européen. D'une autonomie de 3500 à 4000 km, il pourrait embarquer jusqu'à 200 passagers à partir de 2035.

Marine Benoit, Loïc Chauveau,
Fabrice Nicot, Sylvie Rouat

SEPT MILLIARDS D'EUROS SUR DIX ANS : c'est le chèque que le gouvernement français a signé en septembre 2020 pour son Plan hydrogène. L'Allemagne, le Portugal, l'Espagne, l'Italie, l'Autriche et les Pays-Bas mettent également des milliards sur la table pour développer la filière. Des investissements qui seront complétés par ceux de la Commission européenne, qui pourraient atteindre 470 milliards d'euros au cours des trente prochaines années. Cette « ruée vers l'hydrogène » doit permettre d'atteindre l'objectif européen de neutralité carbone à l'horizon 2050, c'est-à-dire un équilibre entre les émissions de carbone anthropiques et leur absorption naturelle. Or l'utilisation de l'hydrogène pour produire de l'énergie ne libère pas de dioxyde de carbone (CO_2), seulement de la vapeur d'eau. Un puissant gaz à effet de serre certes, mais dont la persistance dans l'atmosphère se compte en jours, contre environ un siècle pour le CO_2.

« J'entends parler de cette solution depuis plus de trente ans, mais elle est enfin en train de devenir une réalité dans notre vie quotidienne », s'enthousiasme François Tapin, directeur général adjoint d'*Energy Observer*, un navire ▸

AIRBUS 2020 TOUS DROITS RÉSERVÉS

JEAN-ERIC PASQUIER/GAMMA-RAPHO

Le site d'Air Liquide à Bécancour (Canada) vient d'entamer une production industrielle d'hydrogène vert à partir de l'électrolyse de l'eau, alimentée par de l'énergie renouvelable.

▶ à hydrogène qui sillonne les mers depuis 2017 pour tester de nouvelles technologies énergétiques propres. De fait, alors que l'hydrogène compte aujourd'hui pour moins de 2 % de la consommation énergétique européenne, il atteindra 13 à 14 % en 2050.

Mais pour que la promesse environnementale soit tenue, encore faut-il que la production d'hydrogène soit « propre ». Car le dihydrogène (H_2, communément et abusivement appelé hydrogène) n'est pas une énergie en soi mais un vecteur énergétique, à l'instar de l'électricité. Le produire nécessite donc une source. Or aujourd'hui, 96 % des 74 millions de tonnes d'hydrogène obtenues annuellement sont issues de la transformation d'énergies carbonées et notamment du gaz naturel (essentiellement du méthane). C'est « l'hydrogène gris ». « L'hydrogène vert », obtenu à partir d'énergies renouvelables telles que l'éolien ou le solaire, ne représente encore que 4 %. Il permet de stocker les excédents de production de ces sources d'électricité. Transformés en hydrogène, ils peuvent être stockés et réinjectés en temps voulu pour pourvoir à nos besoins énergétiques. Problème : « *Le rendement de la transformation n'est que de 28 %* » souligne Samuele Furfari, chimiste belge, président de la Société européenne des ingénieurs et des industriels (SEII). Un constat que tempère Bruno Debray, spécialiste de l'hydrogène à l'Ineris (Institut national de l'environnement industriel et des risques) : « *Cela permet au moins de réutiliser cette énergie qui, sinon, est perdue !* »

Le coût d'un kilo d'hydrogène

Gris (issus de la transformation d'énergies carbonées) : **1 à 1,50 euro.**

Vert (source d'énergie renouvelable) : **5 à 10 euros.**

Blanc (d'origine naturelle) : **moins de 1 euro.**

Faire mieux que l'éolien et les panneaux solaires

Vert, gris : le débat autour de la solution hydrogène est donc complexe. « *Vu depuis la France, l'hydrogène "vert" semble vertueux*, concède Alain Prinzhofer, chercheur au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (Lied). *Mais à l'échelle mondiale, éoliennes et panneaux solaires sont peu respectueux de l'environnement et du travail humain.* » La fabrication d'une éolienne nécessite, par exemple, 400 kg de néodyme, une terre rare extraite en Chine en utilisant des solvants toxiques, cancérogènes, provoquant des ravages sur la faune, la flore et les eaux.

D'où l'espoir du développement d'une troisième voie, celle de « l'hydrogène blanc », c'est-à-dire naturel *(lire p. 34)*. Il s'agit de poches de gaz découvertes dans la croûte de continents anciens mais dont l'exploration est encore balbutiante. Renouvelable à l'échelle humaine, cette ressource peut être soit utilisée *in situ* pour produire de l'électricité, soit exportée. Las, « *le Plan hydrogène français n'accorde pas une ligne à cette solution* », s'alarme Alain Prinzhofer. La solution hydrogène est réelle, mais le choix de sa « couleur » réclame plus de recherches scientifiques. ■ **S. R.** @srouat1

APPROVISIONNEMENTS

Une distribution encore à inventer

Très peu dense, l'hydrogène est difficile à transporter sous forme de gaz et demande beaucoup d'énergie pour être liquéfié. Aussi, plutôt que de l'acheminer pur par camion, conditionné à 250 bars dans des bouteilles, il peut être injecté dans les réseaux existants de gaz naturel, soit sous sa forme pure (jusqu'à 6 %), soit par méthanation. Celle-ci consiste à marier le dihydrogène (H_2) au dioxyde carbone (CO_2) pour produire du méthane (CH_4), qui n'est rien d'autre que le gaz de ville. De tels projets existent déjà à Fos-sur-Mer, dans les Bouches-du-Rhône (projet Jupiter 1000) ou à Dunkerque, dans le Nord (Grhyd). Par ailleurs, un pipeline pour l'hydrogène est projeté entre les grands parcs éoliens d'Espagne et l'Allemagne afin d'alimenter son industrie. Et *quid* de l'alimentation des stations-service ? Difficile d'imaginer qu'on puisse les approvisionner par des camions de 40 tonnes transportant à peine 300 kg d'hydrogène. Les ingénieurs cherchent à optimiser le remplissage des bombonnes mais la véritable solution serait de construire à proximité de petites unités d'électrolyse pour une production locale d'hydrogène. Ce qui est techniquement faisable à condition de disposer du terrain pour les implanter. L. C.

GORDON WELTERS/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

Le Coradia iLint, premier train à hydrogène au monde, développé par Alstom, est en service en Allemagne depuis 2018. Il est équipé de piles à combustible qui transforment de l'hydrogène stocké sur le toit et l'oxygène ambiant en électricité.

Comment le carburant du futur compte s'imposer

Voiture, camion, train… et demain avion. La pile à combustible peut permettre de s'affranchir des encombrantes batteries des véhicules électriques. À condition de développer un réseau complet de stations de recharge.

« Taxi ! » Voilà comment, à Paris, on peut faire l'expérience de la « mobilité hydrogène ». Il suffit de héler l'un des véhicules bleus de la flotte Hype — unique en France — appartenant à la Société des taxis électriques parisiens (Step) lancée en 2015 (une centaine aujourd'hui, près de 600 fin 2021). Leurs Toyota Mirai fonctionnent à l'hydrogène. La pile à combustible embarquée transforme le gaz en électricité afin d'alimenter le moteur *(voir l'infographie pp. 32-33)*. Pour faire le plein, il ne faut au chauffeur que 3 minutes. Pour 50 euros environ, la voiture parcourt alors un peu plus de 500 km sans rejeter un gramme de CO_2, rien que de l'eau. Si souvent annoncés depuis le prototype mis au point par Chrysler en 1994, les véhicules à hydrogène sont-ils enfin sur le point de passer la vitesse supérieure ? *« Oui, cette fois, on y va,* affirme Valérie Bouillon-Delporte, vice-présidente de l'association France Hydrogène chargée de coordonner les différents acteurs de la filière. *Et je pense qu'il n'y aura pas de retour en arrière car la pression sociétale est forte. Au niveau européen, de plus en plus de grandes villes [dont Paris] annoncent une interdiction des moteurs thermiques pour 2030. Et pour y parvenir, nous aurons besoin de l'hydrogène car les véhicules électriques* **Suite page 35**

AFHIPAC

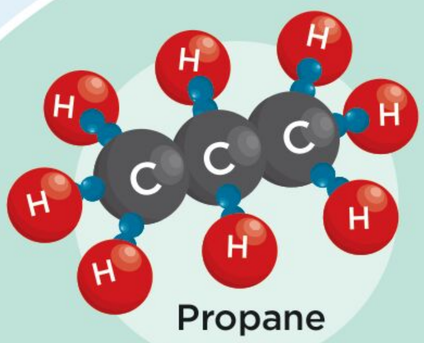
« Nous aurons besoin de l'hydrogène pour parvenir à l'interdiction des moteurs thermiques prévu pour 2030 dans de grandes villes européennes »

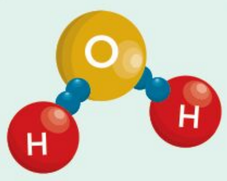
Valérie Bouillon-Delporte, vice-présidente de l'association France Hydrogène

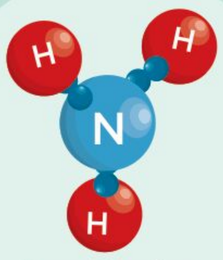
Le parcours vertueux de l'hydrogène vert

Pour produire en abondance de l'hydrogène, la technique la plus efficace consiste à casser la molécule d'eau. Pour être non polluante, cette opération, qui nécessite un fort courant électrique, implique d'utiliser une énergie propre issue des panneaux solaires et des éoliennes. On parle alors d'hydrogène vert.

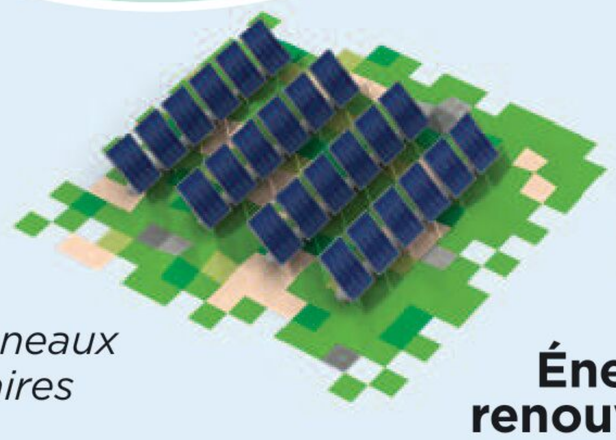
Par Marine Benoit @marin_eben







L'hydrogène pur est rare dans la nature. Il est souvent combiné à d'autres éléments comme l'azote (ammoniac), le carbone (propane) ou l'oxygène (eau).

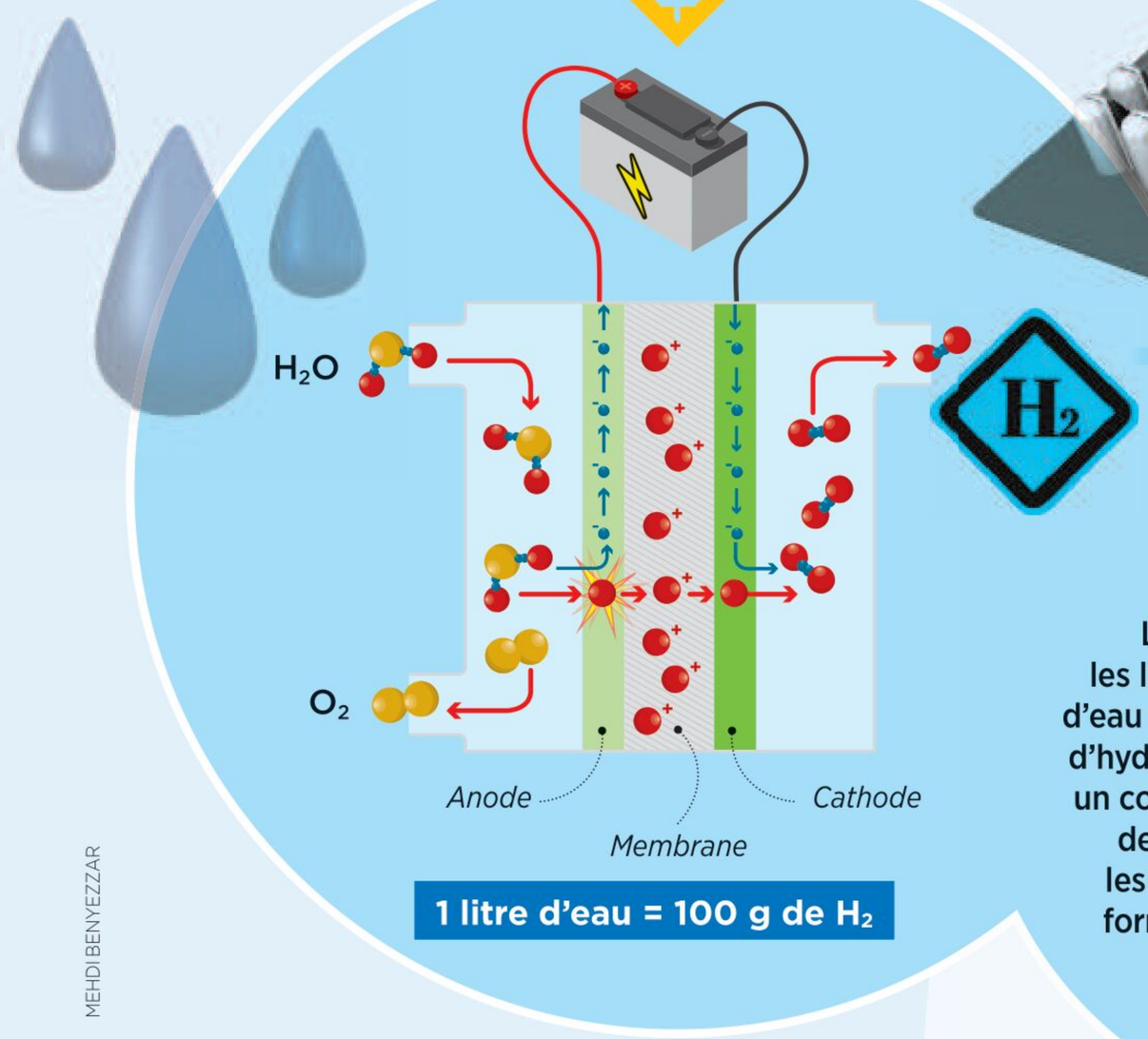


Énergie renouvelable

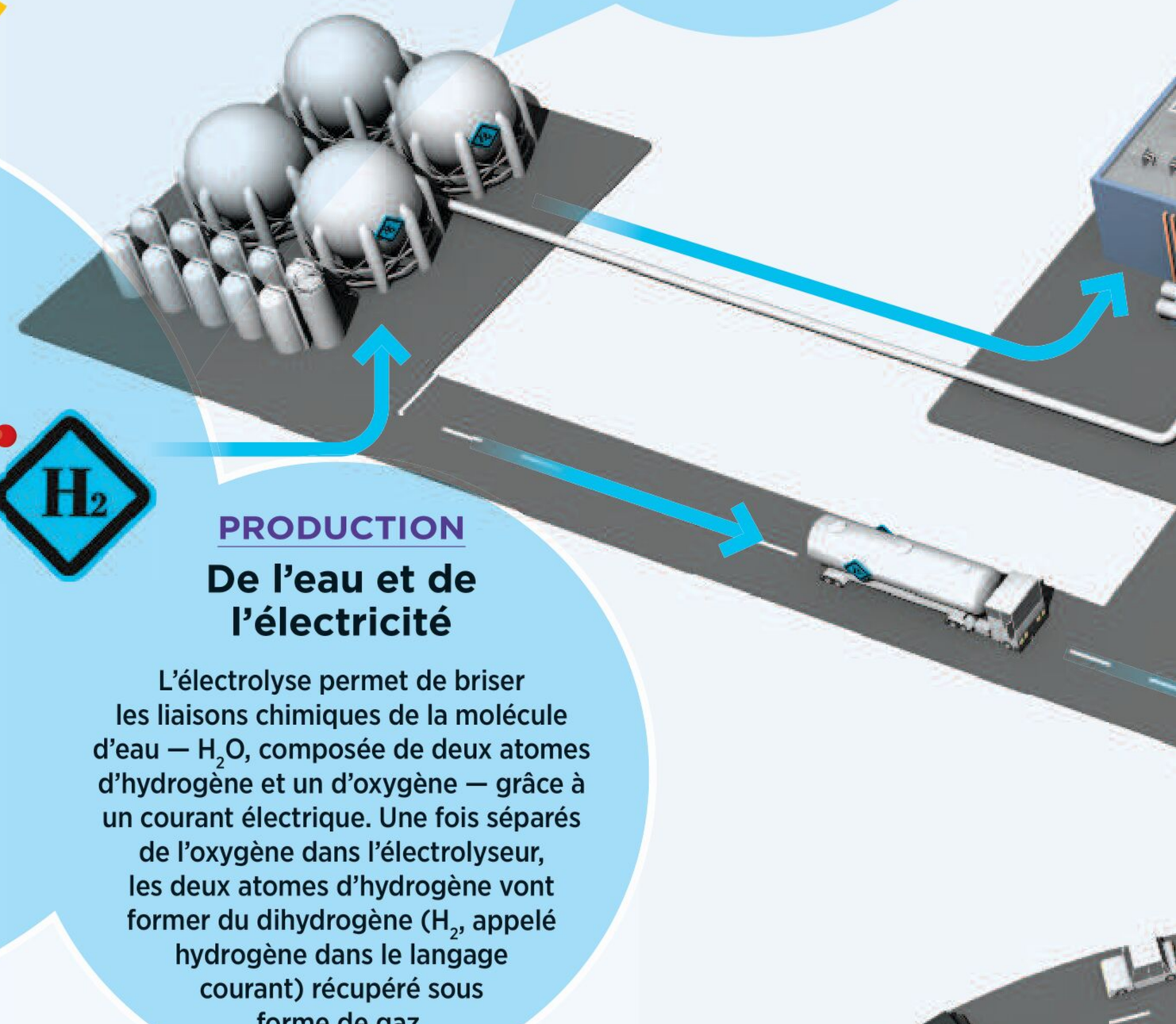
STOCKAGE

Des défis logistiques

L'hydrogène est très peu dense : il occupe à masse égale beaucoup plus de volume que tout autre gaz, un handicap pour son stockage et son transport. Il faut donc le comprimer dans des bouteilles ou des pipelines. Entre 6,4 et 7 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars sont nécessaires pour produire autant d'énergie qu'un litre d'essence.



1 litre d'eau = 100 g de H_2



PRODUCTION

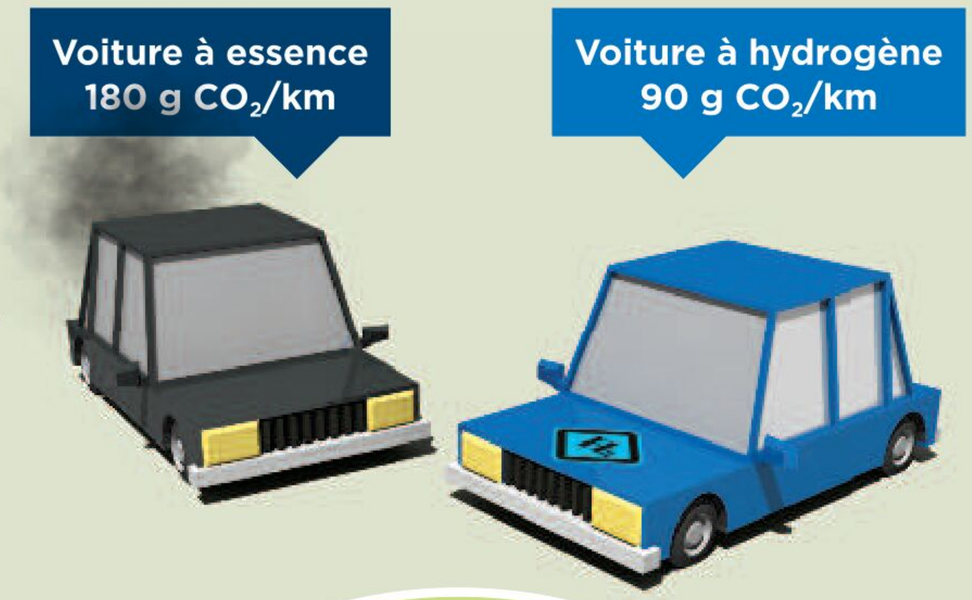
De l'eau et de l'électricité

L'électrolyse permet de briser les liaisons chimiques de la molécule d'eau — H_2O, composée de deux atomes d'hydrogène et un d'oxygène — grâce à un courant électrique. Une fois séparés de l'oxygène dans l'électrolyseur, les deux atomes d'hydrogène vont former du dihydrogène (H_2, appelé hydrogène dans le langage courant) récupéré sous forme de gaz.

MEHDI BENYEZZAR

Des véhicules beaucoup moins polluants

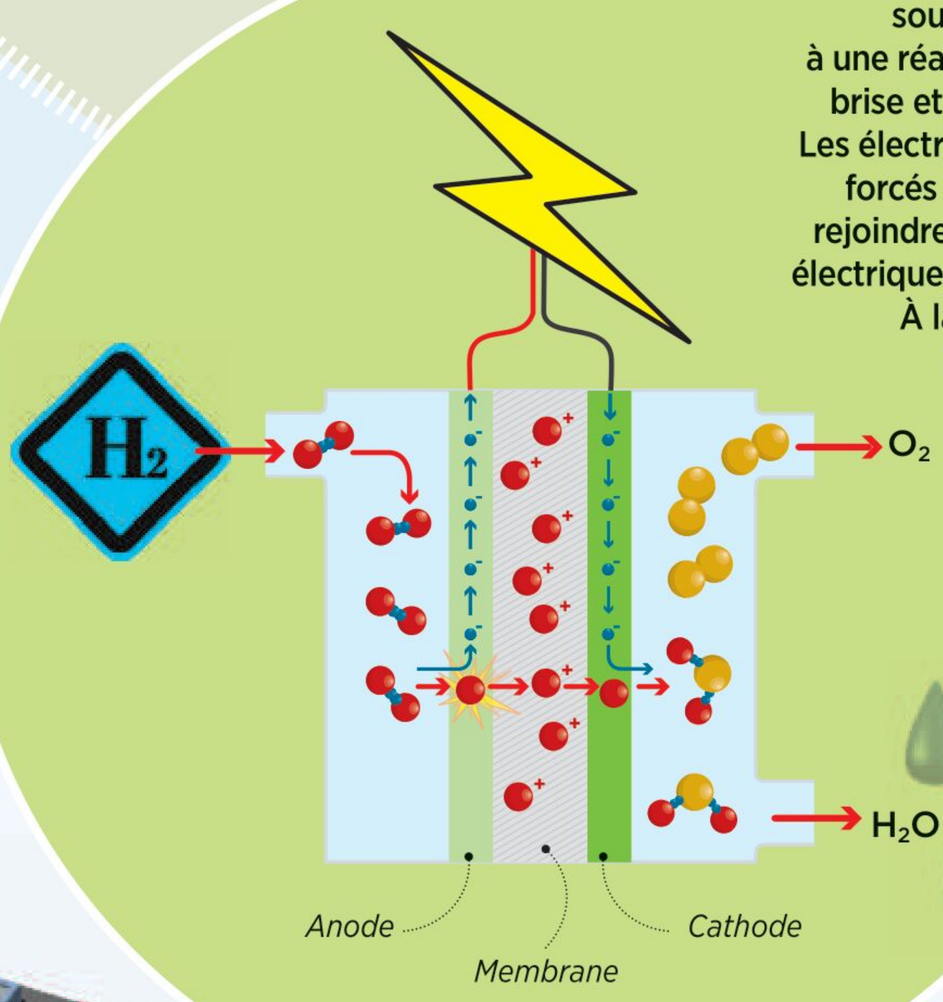
La molécule d'hydrogène est particulièrement énergétique, avec ses 33 kWh/kg. La combustion de 1 kg d'hydrogène libère environ deux fois plus d'énergie que 1 kg de gaz naturel et trois fois plus que 1 kg de gazole ! Pour une voiture à essence qui rejette des particules fines et des oxydes d'azote, il faut compter 180 g de CO_2/km renvoyés dans l'atmosphère (en prenant en compte la fabrication de la voiture elle-même, l'extraction du pétrole, son raffinage et son transport). Une voiture électrique fonctionnant à l'hydrogène vert rejette uniquement de la vapeur d'eau et environ 90 g de CO_2/km (en prenant en compte la fabrication de la voiture, du moteur et de la pile à combustible).

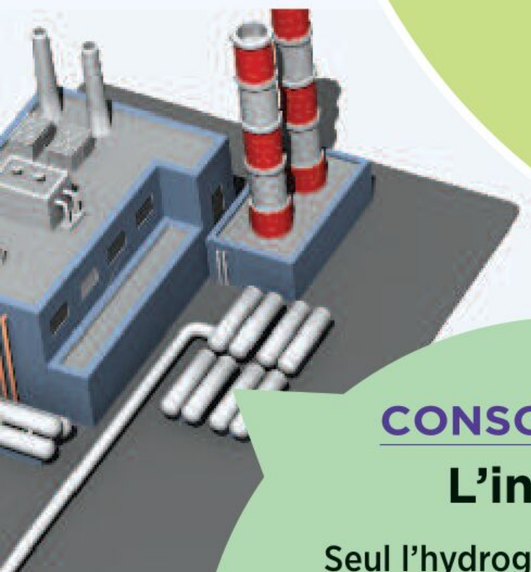


PILE À COMBUSTIBLE

Comment l'hydrogène génère de l'électricité

La pile à combustible convertit l'énergie chimique en énergie électrique, soit le procédé inverse de l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène est introduit sous forme de gaz à l'anode. Grâce à une réaction électrochimique, la molécule se brise et libère des électrons et des protons. Les électrons, bloqués au centre de la pile, sont forcés d'emprunter un autre chemin pour rejoindre la cathode et produisent un courant électrique, qui alimentera le moteur du véhicule. À la cathode, la molécule d'eau se reforme et est évacuée sous forme de vapeur.





CONSOMMATION

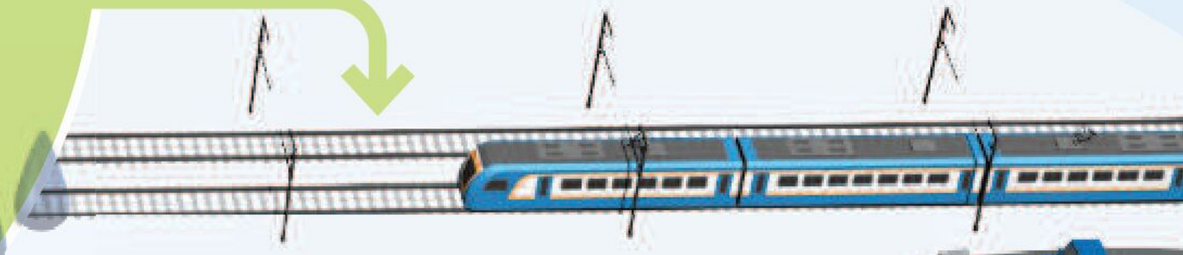
L'industrie

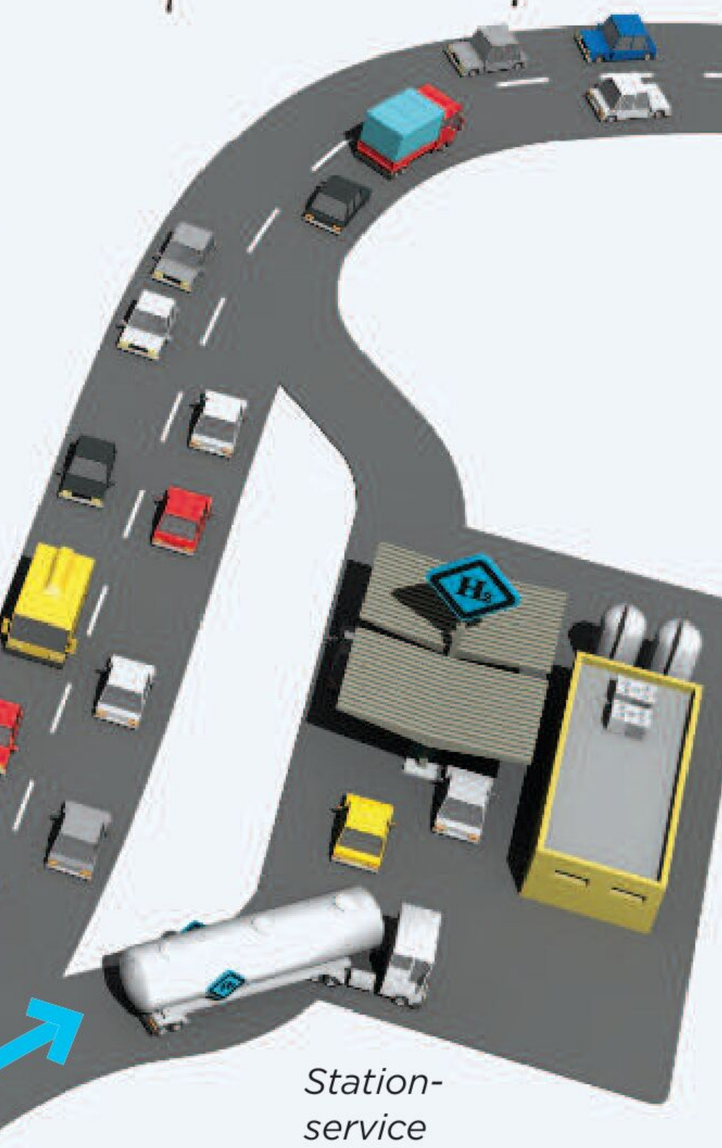
Seul l'hydrogène est capable de « décarboner » rapidement certains secteurs de l'industrie (sidérurgie, ciment, chimie). Il entre en effet comme réactif dans de nombreux procédés industriels : raffinage du pétrole, synthèse d'ammoniac pour les engrais ou méthanol. Il pourrait aussi remplacer le charbon dans les fours.

CONSOMMATION

Les transports

L'hydrogène vert est surtout attendu dans les transports lourds, là où les batteries électriques sont aujourd'hui insuffisantes : l'aéronautique, le ferroviaire et le maritime. Mais le jour où sa production deviendra rentable, il pourra concurrencer la voiture électrique avec batteries.





Station-service

BRUNO DEBRAY INGÉNIEUR À L'INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES (INERIS)

« Les conditions de sécurité de son utilisation restent à définir »

Avant de pouvoir déployer l'hydrogène comme carburant dans les avions, les trains, les voitures… ou comme moyen de chauffage individuel, il est fondamental d'en maîtriser tous les risques.

« Comme pour tout vecteur d'énergie et tout carburant, la manipulation d'hydrogène comporte des risques.
C'est un gaz inflammable, à l'instar du méthane et du propane. Il est très sensible : une simple étincelle d'électricité statique peut l'enflammer. La molécule d'hydrogène est petite et fuit facilement, mais cela fait aussi de l'hydrogène un gaz peu dense qui se dilue facilement dans l'air et ne crée pas de nappe. Cependant, en cas de fuite dans un espace confiné, ou à l'air libre si le débit est suffisant, il peut provoquer une explosion s'il est enflammé. Cela s'est produit en 2019 à Kjørbo, en Norvège, dans une station de distribution d'hydrogène, heureusement sans faire de victimes. La fuite était due à une erreur de montage de réservoir. Du fait de sa faible densité, l'utilisation de l'hydrogène comme carburant pour les véhicules nécessite de le stocker à une pression de 700 bars (contre 200 pour le méthane) ! L'hydrogène est par ailleurs agressif, en particulier pour les métaux. La recherche en science des matériaux est donc importante pour concevoir les équipements destinés à être en contact avec l'hydrogène. Comprendre les phénomènes dangereux et les scénarios de défaillance l'est tout autant pour définir les mesures de maîtrise des risques. Nous travaillons depuis des années sur tous ces aspects. Par exemple, pour définir des normes, nous

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR LA RECHERCHE

ISABELLE MORETTI MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
CHERCHEUSE À L'UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR (E2S UPPA)

« Les ressources naturelles d'hydrogène deviendront un véritable complément »

Ce gaz, que l'on savait présent sous les océans, l'est également à terre. Ses sources renouvelables exploitables naissent dans des contextes géologiques particuliers qui sont de mieux en mieux identifiés.

« Il y a un siècle on fabriquait le gaz de ville en brûlant du charbon, puis de grandes réserves de gaz naturel ont été trouvées et on a presque partout cessé de fabriquer ce gaz industriel qui coûtait plus cher que le natif, dont la fabrication était énergivore et polluante et qui contenait du monoxyde de carbone hautement toxique. La même évolution peut-elle avoir lieu pour l'hydrogène ? Sans doute, mais évidemment, comme toujours avec les ressources naturelles, pas partout.
De l'hydrogène est généré journellement sur la planète : les roches s'oxydent au contact avec l'eau (H_2O), gardent l'oxygène et libèrent l'hydrogène (H_2). Un

déclenchons et analysons des feux d'hydrogène, des explosions de réservoirs, etc. Reste que l'hydrogène est utilisé depuis des décennies dans l'industrie, ce qui a permis de développer une maîtrise des risques et une réglementation adaptée. Depuis 2009, un règlement européen fixe les normes de sécurité des voitures à hydrogène. Il définit les exigences de construction et les procédures de test. Le réservoir, protégé par la structure du véhicule, est doté de vannes qui se ferment en cas de choc, d'autres le protégeant en cas d'incendie. Il est ainsi quasi indestructible. Il reste à fixer les normes pour les nouvelles applications : bateaux, trains, avions, chauffage... »

Propos recueillis par S. R.

SOPHIE RODRIGUEZ / DIVERGENCE POUR SCIENCES ET AVENIR LA RECHERCHE

phénomène connu depuis une quarantaine d'années sur les dorsales océaniques — ces chaînes de volcans sous-marins où se créent les océans — mais on est en train de réaliser que cela se produit aussi à terre. Après des découvertes fortuites par des foreurs qui cherchaient de l'eau, comme au Mali, ou des hydrocarbures, aux États-Unis ou en Australie, scientifiques, ingénieurs, industriels s'organisent. Les données du Mali, où la production d'hydrogène naturel a démarré il y a sept ans pour produire l'électricité du village voisin, montrent que la pression dans le puits ne diminue pas, ce qui signifie que le réservoir se remplit en permanence. Les contextes géologiques propices à la découverte de sources d'hydrogène naturel se dessinent à mesure que la recherche progresse. Ce sont d'une part les régions où des roches issues du manteau terrestre se retrouvent au contact soit de l'eau de mer, comme au niveau des dorsales océaniques, soit de l'eau de pluie, comme dans le rift africain ou en Islande. Ensuite, dans des régions où d'anciennes croûtes océaniques subissent des phénomènes de compression (Oman, Nouvelle-Calédonie...). Enfin, à proximité de roches riches en ions métalliques comme le fer sur des portions très anciennes de la croûte continentale telles qu'on peut en trouver en Australie, en Russie, aux États-Unis ou au Brésil. Cet hydrogène renouvelable et peu cher viendra compléter celui issu des électrolyseurs. De quoi promette un bel avenir à l'hydrogène. »

Propos recueillis par L. C.

Suite de la page 31 *à batterie ne sont pas adaptés à tous les usages, en raison du temps de recharge.* »

Si l'urgence environnementale semble offrir enfin un débouché aux véhicules à hydrogène, leur arrivée devrait se faire progressivement. D'abord avec les flottes professionnelles : réseaux de bus et taxis, mais aussi bennes à ordures, poids lourds, petits utilitaires. Le circuit plus ou moins contraint de ces véhicules permet en effet de limiter le « problème du plein », talon d'Achille de la filière : difficile d'improviser une escapade en voiture à hydrogène avec seulement 40 stations sur tout le territoire (dont 4 en Île-de-France). Pour resserrer le maillage, le ministère de la Transition écologique prévoit la construction de 400 à 1000 stations accessibles à tous d'ici à 2028. Ce sera encore dix fois moins que les stations essence, mais cela devrait rassurer les automobilistes, condition nécessaire pour que la voiture individuelle se convertisse massivement.

Une offre limitée pour les voitures particulières

C'est qu'en 2020, seulement 400 véhicules légers à hydrogène circulaient en France. Il faut dire que l'offre est limitée. Les constructeurs français se concentrent sur les utilitaires, par exemple le Kangoo Z.E. ou le Master Z.E. de chez Renault, vendus autour de 30 000 et 50 000 euros. Selon le constructeur français, 300 Kangoo Z.E. auraient été écoulés fin janvier 2021. Pour les particuliers, il faut se tourner vers le coréen Hyundai ou les japonais Honda et Toyota, ce dernier faisant figure de pionnier avec sa Mirai sortie dès 2014. Quitte à essuyer les plâtres ? « *Nous avions un objectif modeste : vendre 3000 unités par an*, explique Frank Marotte, P-DG de Toyota France. *Il a été atteint. Nous venons de lancer la version 2, avec l'ambition*

TOSHIKAZU SATO/AP/SIPA

3000 Toyota Mirai ont été vendues en moyenne par an dans le monde depuis la commercialisation de ce modèle en 2014. Le constructeur vient de lancer une deuxième version avec pour objectif de multiplier les ventes par dix.

d'en écouler 30 000 par an, entre le Japon, la Californie et l'Europe. » Reste à savoir à quel prix... Il fallait débourser environ 80 000 euros pour acquérir une Mirai première génération, et il n'est pas dit que pour cette somme, le constructeur (qui ne communique pas sur ce sujet) rentrait dans ses frais... Pour baisser les coûts, Toyota espère qu'un élargissement du marché permettra de réaliser des économies d'échelle. « *Notre objectif est de proposer une Mirai à 30 000 euros dans moins de dix ans* », reprend Frank Marotte. La rentabilité reste cependant une perspective encore lointaine, ce qui peut en décourager certains, comme Mercedes-Benz qui a jeté l'éponge en 2020.

Aussi l'hydrogène pourrait-il s'imposer plus vite dans les transports en commun, le train ou les camions. Des bus à hydrogène ont en effet commencé à circuler dès 2010. Mais à l'époque, ils ne coûtaient pas moins de 1,5 million d'euros, soit environ cinq fois plus qu'un modèle Diesel. Dix ans plus tard, grâce à une diminution des coûts de fabrication, mais aussi à une subvention de l'Union européenne d'environ 200 000 euros par véhicule, le prix n'est plus « que » de 400 000 euros. Début 2021, 21 véhicules ont été déployés à titre expérimental à Lyon, Le Mans, Toulon... Dijon envisage de convertir toute sa flotte, soit 200 bus. La RATP teste depuis fin octobre 2020 entre Choisy-le-Roi et Paris un véhicule du constructeur polonais Solaris. Elle devrait rejoindre plus largement le mouvement dans le cadre du projet « 1000 bus hydrogène en France » à l'horizon 2024. Côté ferroviaire, la SNCF compte profiter de l'hydrogène pour transformer en rames électriques ses TER Diesel, soit 50 % des motrices. Objectif : faire circuler jusqu'à 14 rames hydrogène Alstom d'ici à 2025. Soit le même nombre que sur deux lignes régionales de Basse-Saxe, en Allemagne, où l'expérimentation commencée en 2018 s'est révélée concluante.

Les constructeurs de poids lourds suivent le mouvement

La transition pourrait être également rapide pour le transport routier, car, dans le cadre du Clean Mobility Package, la Commission européenne impose de réduire les émissions de gaz à effet de serre des poids lourds de 15 % dès 2025. « *Le constructeur Iveco estime ainsi que 6 à 10 % de ses véhicules de plus de 16 tonnes devront être électriques pour répondre à ces exigences* », selon Valérie Bouillon-Delporte. Et pour y arriver, la pile à hydrogène semble plus pertinente que les batteries, dont l'encombrement et le poids augmentent rapidement avec la taille du véhicule et sa capacité d'emport.

Les pionniers sont déjà sur les routes : depuis octobre 2020, sept camions à hydrogène Xcient, construits par le coréen Hyundai, circulent ainsi en Suisse. Ils sont capables d'emporter 37 tonnes sur 400 km. De leur côté, Daimler, Iveco, OMV, Shell et Volvo viennent de s'associer afin de développer les camions à hydrogène en Europe, avec comme objectif d'atteindre les 10 000 véhicules sur la période 2025-2030. Reste à gagner le pari environnemental, en assurant une alimentation exclusive avec de l'hydrogène « vert ». ■ **F. N.** @fnicot07

AÉRONAUTIQUE

Les défis de l'avion à hydrogène

Mi-septembre 2020, Airbus a annoncé le lancement de trois projets d'avions à hydrogène fonctionnant tous sur le même principe : une propulsion hybride. Les avions utilisent la combustion de l'hydrogène avec l'air comme un carburant classique mais en ne rejetant que de l'eau, complétée par un apport électrique grâce à une pile à combustible afin de faire tourner leurs hélices. Le plus performant de ces trois modèles n'embarquera toutefois pas plus de 200 passagers au-delà de 3700 km, faute de pouvoir emporter suffisamment d'hydrogène. Et encore, pour parvenir à ces performances, les avions devront transporter l'hydrogène sous forme liquide à -253 °C ! Un défi technique, mais pas insurmontable selon Airbus, qui compte commercialiser ces avions « zéro émission » d'ici à 2035. F. N.

Des travaux de rénovation énergétique à l'obtention de vos aides,

hellio

s'occupe de tout

Isolation thermique

Changement de chauffage

Rénovation globale

Vous vivez en *maison individuelle* ?

particulier.hellio.com

Vous vivez en *copropriété* ?

copropriete.hellio.com

Ou appelez le (appel gratuit) **0 800 080 230**

Ma Prime Rénov'

ENGAGÉ POUR FAIRE

Prime Énergie

Une solution pour décarboner l'industrie

L'hydrogène sert à désulfurer le pétrole ou à produire de l'ammoniac. Il pourrait aussi remplacer le charbon en sidérurgie, à condition que sa source de production soit d'origine renouvelable.

ZUMA PRESS/REA

L'électrolyseur d'une puissance de 2 mégawatts de l'usine d'Apex Energy à Laage (Allemagne), inaugurée en juin 2020, devrait produire plus de 300 tonnes d'hydrogène zéro-carbone par an.

Dans l'industrie, l'hydrogène est une réalité depuis 1902 avec la création de L'Air liquide (devenu Air Liquide) par l'ingénieur français Georges Claude. Aujourd'hui, la France en consomme 900 000 tonnes par an (sur une consommation mondiale annuelle de 60 millions de tonnes), quasi exclusivement dans le raffinage, où il sert à désulfurer le pétrole, et dans la production d'ammoniac. Le leader mondial Air Liquide a construit plus de 9600 kilomètres de gazoducs pour alimenter ses principaux clients du nord de la France, mais aussi d'Allemagne, de Belgique, ainsi qu'aux États-Unis, dans le golfe du Mexique. Et ce n'est qu'un début. *« Au cours de la décennie, les débouchés vont se multiplier, notamment vers les secteurs cimentiers et sidérurgiques, très polluants, qui vont devoir atteindre la neutralité carbone »*, prédit Philippe Boucly, président de France Hydrogène. De l'hydrogène, mais de l'hydrogène vert. Pas question de le produire à partir de gaz naturel. *« On estime qu'en France, en 2030, au moins 420 000 tonnes d'hydrogène seront d'origine renouvelable »*, précise Philippe Boucly. Les industriels imaginent aussi des circuits de production non polluants. C'est ainsi que le 7 décembre 2020, le sidérurgiste ArcelorMittal a présenté son projet de remplacer le charbon dans ses fours de Dunkerque par de l'hydrogène. Produit à 95 % à partir des gaz de combustion de l'usine, il doit permettre la purification du minerai de fer. De son côté, le cimentier Vicat étudie la transformation de ses fours. *« Nos cimenteries de Montalieu et Saint-Égrève (Isère) vont tester plusieurs technologies hydrogène qui toutes visent à atteindre la neutralité carbone en 2050 »*, annonce Marie Godard-Pithon, directrice Performance et investissements. Le groupe français veut en effet tenter d'instaurer une véritable économie circulaire.

Récupérer la chaleur des fours grâce à l'électrolyse

Le ciment est fabriqué à partir de calcaire et d'argile traités dans des fours à plus de 1400 °C. L'idée est de récupérer la chaleur issue de ce procédé pour alimenter une unité d'électrolyse de l'eau à haute température. *« L'hydrogène produit peut servir pour nos poids lourds mais aussi être transformé en bio-méthane ou en bio-méthanol grâce au CO_2 capté à la sortie du four. Le bio-méthane peut être injecté dans le réseau de gaz et le bio-méthanol utilisé pour la production de biocarburant ou dans l'industrie chimique »*, détaille Marie Godard-Pithon. L'oxygène pur, coproduit de l'hydrogène, est brûlé dans les fours, améliorant ainsi leur rendement énergétique. Sur le point d'être créée, la société Genvia développera un pilote industriel de la technologie d'électrolyse à haute température qui accroît l'efficacité énergétique de la production d'hydrogène.

Si les professionnels de l'hydrogène parient sur un développement rapide dans l'industrie, c'est que celle-ci n'a pas vraiment le choix. Il lui reste trois décennies pour arriver à la neutralité carbone et répondre ainsi aux objectifs de la stratégie nationale bas-carbone. Dans l'industrie, l'hydrogène est autant une opportunité qu'une nécessité. ■

L. C. @Loïc_Chauveau

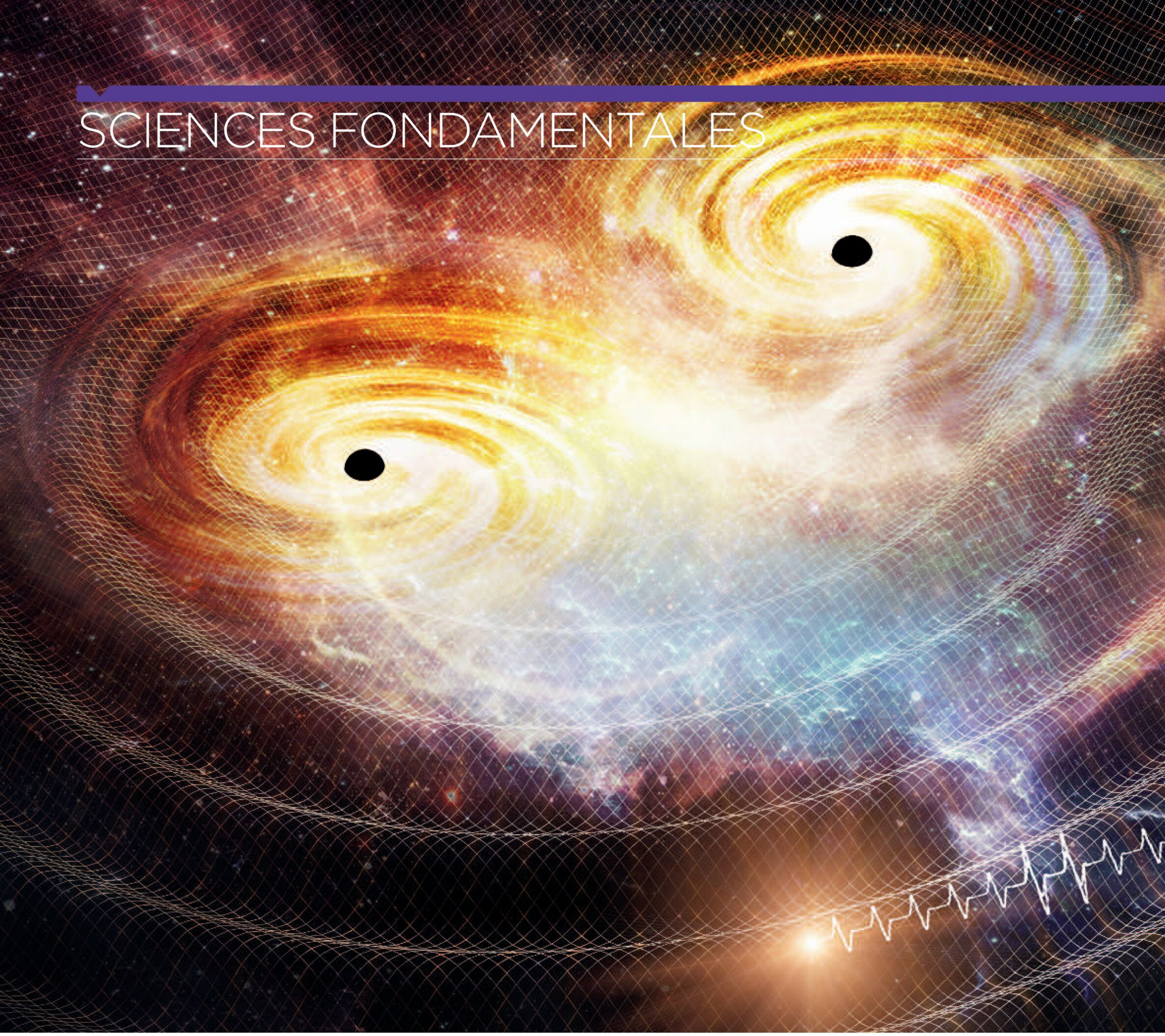
PRENEZ PLACE POUR LE FUTUR

LE POUVOIR DE L'HYDROGÈNE.

Déjà emblématique, la nouvelle Mirai entre dans l'histoire.
Sa technologie Hydrogène vous permet de ne rejeter que de l'eau,
pour concevoir un futur plus responsable, essentiel à tous.
La révolution est en route et vous y êtes bien évidemment conviés.

Toyota Mirai, ne rejette que de l'eau.

Gamme Nouvelle Mirai : consommations en mixte combinée (kg/100 km) et émissions de CO_2 (g/km) selon norme WLTP : de 0,80 à 0,89 et 0. Pour plus de détails, voir toyota.fr



L'étonnante danse des trous noirs

Un réseau de radiotélescopes aurait détecté un nouveau type d'ondes gravitationnelles émis par la rotation de deux trous noirs supermassifs juste avant leur fusion. C'est ce que vient d'annoncer une équipe d'astrophysiciens après plus de dix ans de recherche. Un exploit qui vient compléter les résultats obtenus grâce aux interféromètres Virgo et Ligo, installés respectivement en Italie aux États-Unis.

Par Fabrice Nicot @fnicot07

DIDIER FLORENTZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

◀ **Deux trous noirs supermassifs** en rotation engendrent des ondes gravitationnelles dans l'espace-temps. Leur passage perturbe la régularité observée des flashs d'énergie émis par des étoiles à neutrons, les pulsars. La mesure de ces perturbations par des radiotélescopes révèle leur existence (vue d'artiste).

C'EST UN COUPLE de trous noirs de plusieurs milliards de masses solaires, enchaînés l'un à l'autre par l'attraction gravitationnelle. Ils se tournent autour, de plus en plus vite, jusqu'à des vitesses proches de celle de la lumière... Puis vient la fusion finale, en un seul trou noir plus massif encore que ses « parents ». Cette danse fatale se déroule au cœur des galaxies, si loin de nous qu'elle semble inaccessible à tout instrument. Pourtant, les scientifiques regroupés au sein du consortium américain NANOGrav espèrent en avoir saisi le faible écho. Car les trous noirs, lorsqu'ils tournent ainsi très vite, font des vagues. Des vagues... dans l'espace-temps. Tout comme une embarcation laisse un sillage sur l'eau, ces masses très compactes en mouvement rapide engendrent des séries d'ondes gravitationnelles, de minuscules contractions-dilatations de l'espace et du temps, qui se propagent dans l'Univers à la vitesse de la lumière. L'équipe de NANOGrav serait parvenue à les détecter, explique-t-elle dans la revue *Astrophysical Journal Letters* alors qu'elles n'étaient jusque-là qu'une prévision théorique. Une découverte annoncée avec prudence car le signal obtenu est très ténu. S'il venait à être confirmé, il s'agirait de la première détection d'ondes gravitationnelles associées à ce type d'astres. Et ce n'est pas un seul couple de danseurs que NANOGrav aurait enregistré, mais des dizaines... Voilà de quoi susciter l'intérêt de deux autres programmes d'observation qui poursuivent la même quête : l'européen Epta (European Pulsar Timing Array) et l'australien PPTA (Parkes Pulsar Timing Array).

« *Les résultats publiés par NANOGrav sont encourageants*, estime Antoine Petiteau, du Laboratoire astroparticule et cosmologie (CNRS/université de Paris), et membre d'Epta. *De notre côté, nous observons un signal similaire. Mais pour confirmer ce résultat, nous devons encore vérifier qu'il n'est pas dû à une erreur systématique des instruments, ou bien à une mauvaise estimation de la position de la Terre dans le Système solaire. Car ce genre de mesure demande une précision extrême.* »

Pour s'en convaincre, il suffit de se plonger dans la méthode utili- ▶

CONTEXTE

L'existence des ondes gravitationnelles a été postulée par Albert Einstein dès 1915, comme une conséquence de sa théorie de la relativité générale. Elles traduisent la déformation de l'espace-temps sous l'effet d'une masse. Il a fallu attendre 2016 pour obtenir la première mesure d'une onde gravitationnelle émise lors de la fusion de deux trous noirs de quelques dizaines de masses solaires. Aujourd'hui, les chercheurs tentent de mesurer d'autres types d'ondes gravitationnelles, permettant d'observer des trous noirs bien plus massifs.

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

Depuis le sol ou demain dans l'espace, plusieurs observatoires de par le monde captent des ondes gravitationnelles de différentes fréquences, révélant le ballet de trous noirs ou d'étoiles à neutrons, inaccessibles à tout autre moyen d'observation.

Méthode	Instruments	Fréquences des ondes gravitationnelles	Exemples d'événements observés
Interférométrie au sol	▸ **VIRGO** (Europe) ▸ **LIGO** (États-Unis) ▸ **KAGRA** (Japon)	10 à 10 kHz	Fusion de trous noirs de quelques dizaines de masses solaires, couple d'étoiles à neutrons en rotation
Interférométrie dans l'espace	▸ **LISA** (Europe, lancement vers 2034)	0,0001 Hz à 0,1 Hz	Fusion de trous noirs de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs dizaines de millions de masses solaires, « spiralement » d'une étoile à neutrons autour d'un trou noir supermassif
Radioastronomie	▸ **NANOGRAV** (États-Unis) ▸ **EPTA** (Europe) ▸ **CPTA** (Chine) ▸ **PPTA** (Australie) ▸ **SKA** (Afrique du Sud) prévu pour 2027	10^{-9} à 10^{-6} Hz	Fusion de trous noirs de plusieurs milliards de masses solaires
Étude du fond diffus cosmologique	▸ **QUBIC** (Europe, États-Unis) ▸ **CMB-S4** (États-Unis)	10^{-18} Hz	Trace de l'inflation de l'Univers juste après le Big Bang

▸ sée par les chercheurs pour saisir ces ondes. Elle repose sur les pulsars, des étoiles à neutrons qui se comportent comme des phares à l'échelle cosmologique. Ces astres très compacts se forment à la suite de l'effondrement sur elle-même d'une étoile en fin de vie. Leur rayon n'excède pas 20 km, pour une masse entre 1,4 et environ 3 fois celle du Soleil. Les pulsars émettent un puissant jet d'énergie le long de l'axe de leur champ magnétique. « *Ce jet n'est pas aligné avec l'axe de rotation de l'étoile, ce qui crée un effet "phare"*, reprend Antoine Petiteau. *Si la Terre se trouve dans la direction du pulsar, elle reçoit régulièrement un flash d'énergie, un "pulse", d'où le terme de "pulsar". L'intervalle entre deux pulses est de quelques millisecondes à quelques secondes, selon les pulsars. Mais l'intérêt, c'est leur extrême régularité. On les a même utilisés pour contrôler les horloges atomiques.* » Il y a malgré tout quelque chose qui peut perturber ces métronomes célestes : les ondes gravitationnelles.

En effet, cette contraction-dilatation de l'espace-temps au moment du passage de l'onde va créer un petit décalage temporel entre deux pulses. Ils se rapprocheront légèrement, puis s'écarteront, avant de retrouver leur écart initial. Cette variation n'est que de quelques nanosecondes (10^{-9} s). D'où l'extrême précision requise pour mesurer ces pulses dans le domaine des ondes radio où le signal est le plus net — même si le pulsar émet dans quasiment tout le spectre électromagnétique. Pour parvenir à isoler ce signal, l'équipe de NANOGrav a écouté 45 pulsars pendant plus de douze ans grâce au radiotélescope de Green Bank (États-Unis) et du regretté Arecibo (Porto Rico) désormais hors service (*lire* S. et A. *n° 887, janvier 2021*). De son côté, la France en surveille plus d'une cinquantaine, notamment à l'aide du radiotélescope de Nançay (Cher), dans le cadre du programme Epta. Depuis l'hémisphère Sud, le radiotélescope Parkes en Australie en chronomètre une vingtaine.

Parvenir à supprimer le bruit parasite

Pourquoi mettre tous ces pulsars sur écoute, alors qu'un seul suffirait à nous renseigner sur l'existence de ce fond d'ondes qui baigne *a priori* tout l'Univers visible ? « *D'autres phénomènes peuvent perturber la régularité des pulsars dans le domaine radio, comme la présence de gaz ionisé entre les étoiles*, selon Antoine Petiteau. *L'idée, en écoutant plusieurs pulsars, est de supprimer ce bruit parasite, et faire ressortir l'onde.* » C'est ce que l'on appelle le rapport signal sur bruit. Le signal ressort clairement lorsque ce rapport est de 5, c'est-à-dire que le signal est cinq fois plus fort que le bruit parasite. Pour l'heure, NANOGrav annonce seulement 3. « *Pour augmenter le rapport signal sur bruit, il faut continuer à accumuler des données* », précise Antoine Petiteau.

Si les scientifiques parvenaient à atteindre 5, cela marquerait une étape importante pour l'astronomie gravitationnelle, une discipline apparue en 2016 avec la détection directe des premières ondes gravitationnelles par l'instrument Ligo aux États-Unis, puis son homologue européen Virgo, situé près de Pise, en Italie. « *C'est un peu comme lorsque les astronomes ont commencé à observer l'Univers non plus seulement dans le domaine de la lumière visible, mais dans l'infrarouge, l'ultraviolet, les ondes radio et*

SHOSTAK, DR SETH/SCIENCE PHOTO LIBRARY

Le Green Bank Telescope (Virginie-Occidentale, États-Unis) a permis aux scientifiques de NANOGrav d'écouter 45 pulsars pendant douze ans pour identifier l'onde gravitationnelle issue de la fusion de deux trous noirs supermassifs.

finalement tout le spectre électromagnétique, explique Alexandre Le Tiec, astrophysicien au Laboratoire Univers et théories de l'observatoire de Paris. *De la même façon, les fréquences des ondes captées par NANOGrav (jusqu'au nanohertz) sont plus basses que celles de Ligo et Virgo (jusqu'à 10 kHz). Elles nous permettent d'observer d'autres astres, comme les trous noirs supermassifs en mouvement…* »

Et c'est bien toute l'originalité des ondes gravitationnelles : elles sont générées uniquement par des masses en mouvement. Ce qui permet d'observer des astres n'émettant aucune lumière, comme les trous noirs justement, lorsqu'ils ne sont pas en train de dévorer une étoile, ou un nuage de gaz… Mais il faut des masses importantes, supérieures à celle du Soleil, et atteignant des vitesses de l'ordre de celle de la lumière, pour générer des ondes détectables. « *C'est pour cela que les trous noirs, mais aussi les étoiles à neutrons, sont des candidats parfaits pour en émettre*, reprend Alexandre Le Tiec. *Ils sont à la fois très massifs, et très compacts. Lorsqu'ils se tournent autour, ils peuvent s'approcher très près. Leur vitesse de rotation au carré est inversement proportionnelle à la distance qui les sépare, ainsi ils peuvent atteindre une vitesse proche de celle de la lumière, avant de fusionner.* » Une telle fusion n'a toutefois pas été observée par NANOGrav, ces ondes correspondant uniquement à la danse d'approche des trous noirs de plusieurs milliards de masses solaires. En revanche, Ligo, Virgo et depuis fin 2019 Kagra, au Japon, enregistrent régulièrement la suite de cette danse, à savoir les derniers tours avant la fusion, mais pour des trous noirs de quelques masses solaires à quelques dizaines de masses solaires, ou des étoiles à neutrons. Leur méthode de détection diffère : il ne s'agit plus de chronométrer des pulsars, mais de mesurer la déformation de faisceaux laser au passage de l'onde gravitationnelle.

D'autres types de détecteurs permettront peut-être un jour d'enregistrer la fusion de ces trous noirs supermassifs, comme le projet européen Lisa. Il s'agit d'un observatoire fonctionnant sur le même principe que Virgo, Ligo et Kagra, mais depuis l'espace. Composé de trois satellites, il devrait entrer en fonction en 2034. D'ici là, les radioastronomes vont continuer d'accumuler des données sur les pulsars, avec notamment l'espoir de parvenir à distinguer les différentes sources de ces ondes, et non plus seulement un « brouhaha ». « *C'est tout l'intérêt de l'astronomie gravitationnelle*, conclut Alexandre Le Tiec. *Non seulement elle a démontré l'existence des couples de trous noirs en rotation, mais à l'avenir, elle nous fournira la "démographie" de ces trous noirs : combien sont-ils ? De quelle taille ? Et où ? De même pour les étoiles à neutrons qui, sauf si elles constituent un pulsar, sont difficilement détectables…* »

D'autres objets étranges pourraient être révélés

D'autres objets, plus étranges encore, pourraient être révélés par les mesures de NANOGrav. Selon une étude publiée dans *Physical Review Letters* du 28 janvier, le signal enregistré serait aussi compatible avec celui qu'émettraient les vibrations des cordes cosmiques, des objets à une seule dimension, très denses, qui se seraient formées 10^{-37} seconde seulement après le Big Bang. Une autre équipe propose quant à elle une émission due à des trous noirs primordiaux, formés là encore juste après le Big Bang, avant même les premières générations d'étoiles ! Ces objets hypothétiques pourraient ainsi ajouter leur partition à celle des trous noirs supermassifs. Il faudra d'autres mesures pour y voir plus clair. Mais même si ce ne sont que des hypothèses, elles en disent long sur ce que pourrait dévoiler l'astronomie gravitationnelle dans les années à venir. ■

A. LE TIEC

« L'astronomie gravitationnelle nous fournira la "démographie" de ces couples de trous noirs en rotation »

Alexandre Le Tiec, astrophysicien au Laboratoire Univers et théories de l'observatoire de Paris

RANÇONGICIEL Virus informatique qui bloque le fonctionnement d'ordinateurs, de logiciels ou l'accès à des données. Les cybercriminels exigent de la victime une rançon en échange d'un — hypothétique — déblocage.

PHISHING Courrier électronique usurpant l'identité d'un organe officiel, d'une entreprise, d'une administration afin de convaincre le destinataire de fournir des données sensibles ou de cliquer sur un lien qui déclenche une attaque informatique.

DÉNI DE SERVICE (DDOS) Multiplication automatisée de tentatives de connexion à un serveur informatique afin de le saturer. Conséquence : les services Web associés sont rendus indisponibles.

La cyberguerre atteint les services public

Jusque-là plus ou moins épargnées par les cyberattaques, les villes et autres collectivités territoriales sont devenues en quelques mois une cible privilégiée. Le contexte de télétravail à cause de la pandémie de Covid-19 contribue à ce phénomène très inquiétant.

Mi-novembre 2020, en pleine pandémie de Covid-19, le CHU de Rouen a fait un plongeon dans le passé, le personnel ressortant papier, crayons... Un rançongiciel avait en effet bloqué courriers électroniques, logiciels et appareils d'imagerie médicale. Les ordinateurs ont rapidement été arrêtés afin d'empêcher la propagation du programme malveillant. Ce n'était pas un cas isolé : déjà en mars, l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP) avait subi une attaque par déni de service *(voir lexique ci-dessus)*.

Depuis l'automne 2019, les experts en sécurité informatique pointent un phénomène inquiétant : les cybercriminels s'en prennent de plus en plus aux administrations, mairies et autres collectivités territoriales. Comme la ville d'Angers et sa communauté de communes mi-janvier 2021, où divers services numériques étaient bloqués par un rançongiciel. Un mois auparavant, le système informatique de Bayonne (Pyrénées-Atlantiques) était ralenti en raison d'un virus détournant la puissance de calcul pour produire de la cryptomonnaie, c'est-à-dire une devise numérique générée par un ensemble de règles informatiques. En février et mars 2020, des rançongiciels touchaient la région Grand Est, Aix-Marseille-Provence Métro-

ALEXEY MALGAVKO / SPUTNIK / AFP

Chronologie : les collectivités face aux attaques informatiques

C.BRAS

« Ce qui s'est passé aux États-Unis est en train d'arriver chez nous, les hackers ont compris qu'il y avait un filon »

Cyril Bras, rapporteur pour le Clusif du chapitre consacré aux collectivités dans l'étude annuelle sur les menaces informatiques

pole et les mairies de Martigues et Marseille (Bouches-du-Rhône). Charleville-Mézières (Ardennes), Vincennes (Val-de-Marne), Besançon (Doubs), Mitry-Mory (Seine-et-Marne), Alfortville (Val-de-Marne), le conseil départemental d'Eure-et-Loir et les chambres d'agriculture des régions Centre-Val de Loire et Nouvelle-Aquitaine ont aussi subi les assauts des cybercriminels. La ville de Bondy (Seine-Saint-Denis) fut même frappée deux fois en novembre 2020.

Les techniques d'attaques restent classiques, à savoir, des programmes malveillants arrivant en grande majorité par *phishing (voir lexique)*, des e-mails trompeurs. « *Il y a une montée en puissance des rançongiciels depuis deux ans*, souligne Éric Hazane, chargé de mission Stratégies des territoires à l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (Anssi), *et cette tendance s'installe.* »

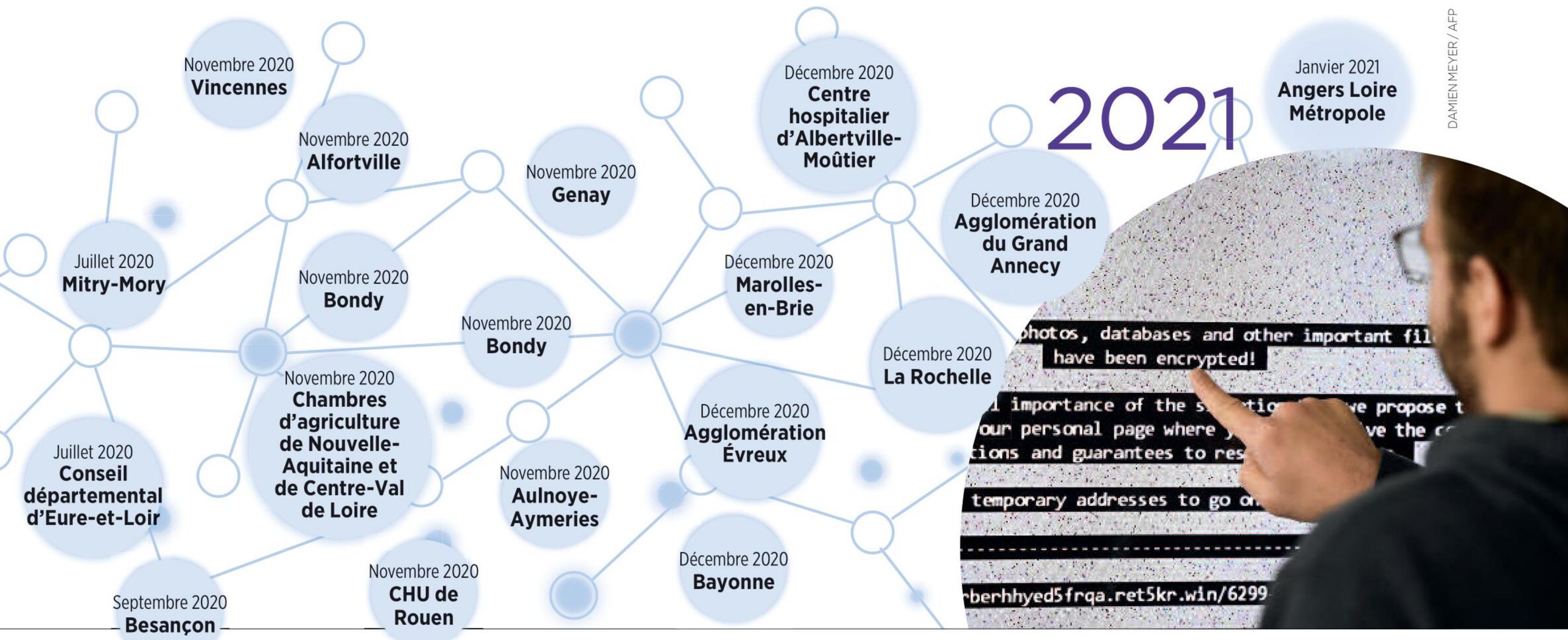
Tous les incidents de sécurité recensés par l'agence ne sont pas d'une gravité égale, et les « défacements » (défiguration de sites Internet) tiennent une bonne part (53 % en 2019), parfois par simple vandalisme. Mais les assauts plus préoccupants se multiplient. « *Pendant longtemps, les collectivités territoriales se pensaient à l'abri des cyberattaques, estimant ne pas être intéressantes*, note Cyril Bras, rapporteur pour le Clusif (Club de la sécurité de l'information français) du chapitre consacré aux collectivités dans l'étude annuelle sur les menaces informatiques. *Or, ces administrations disposent de données précieuses, comme les états civils.* » Coordonnées, permis de conduire, documents d'identité, informations financières, signatures, photographies... autant d'éléments qui peuvent être volés, revendus clandestinement et utilisées pour fabriquer des faux papiers ou usurper des identités, par exemple.

Le phénomène n'est pas propre à la France : depuis plus de deux ans, les États-Unis sont le théâtre d'attaques retentissantes (Atlanta, Baltimore, La Nouvelle-Orléans, Pensacola et comté de Sainte-Lucie en Floride). « *Ce qui s'est passé aux États-Unis est en train d'arriver chez nous, les hackers ont compris qu'il y avait un filon* », continue Cyril Bras. Signe des temps, ce dernier est aujourd'hui vice-président du tout récent Institut national de cybersécurité et de résilience des territoires créé pour aider les responsables en sécurité informatique des collectivités à échanger, mutualiser des informations et discuter de mesures à mettre en place.

Les cybercriminels profitent des faiblesses de ces organismes souvent contraints sur le plan budgétaire. « *Les systèmes sont obsolescents, vieillissants, avec un manque de formation des utilisa-* ▶

POUR EN SAVOIR PLUS

- Le site pratique du gouvernement pour les victimes d'attaques informatiques : **www.cybermalveillance.gouv.fr**
- Le guide de l'Anssi et de l'Association des maires de France : **sciav.fr/889Ansii**
- Le panorama des menaces informatiques et des pratiques de sécurité du Clusif (juin 2020) : **sciav.fr/889Clusif**



DAMIEN MEYER / AFP

CHAÎNE LOGISTIQUE

Vigilance maximum dans le secteur maritime

Ce fut un cauchemar. Le 27 juin 2017, l'armateur Maersk, géant danois du transport maritime, est frappé par le virus informatique NotPetya, qui bloque les ordinateurs (sans demande de rançon). Le réseau se met en berne, les cargos ne partent plus, la chaîne logistique sombre dans le chaos pendant dix jours. Au total, 4000 serveurs, 45 000 PC et 2500 applications doivent être réinstallés, des copies des logiciels sont récupérées en urgence dans une succursale africaine. Maersk perdra 300 millions de dollars de chiffre d'affaires. L'événement sert de déclencheur, en France, à la création d'un organisme de cybersécurité dédié au secteur maritime. France Cyber Maritime naît officiellement mi-novembre 2020. Ports, navires, armateurs, opérateurs *offshore*, terminaux pétroliers ou gaziers, chantiers navals, criées, tous pourront appeler cette structure en cas d'incident. Les experts catégoriseront le problème, son niveau de gravité mais ne répareront pas les dégâts : « *Nous orienterons les victimes vers les prestataires et organismes qualifiés*, souligne Xavier Rebour, administrateur de cette structure basée à Brest. *Mais l'initiative s'accompagne de la création du premier CERT (Computer Emergency Response Team) sectoriel en France.* » Ce genre de plate-forme, chargé d'analyser une attaque pour savoir y répondre, n'existait jusque-là qu'au sein d'entreprises ou sous forme de service.

MALTE OSSOWSKI/SVEN SIMON/ZUMA PRESS/REA

Le virus informatique qui a paralysé l'armateur danois Maersk en 2017 a servi de révélateur de l'ampleur de la menace.

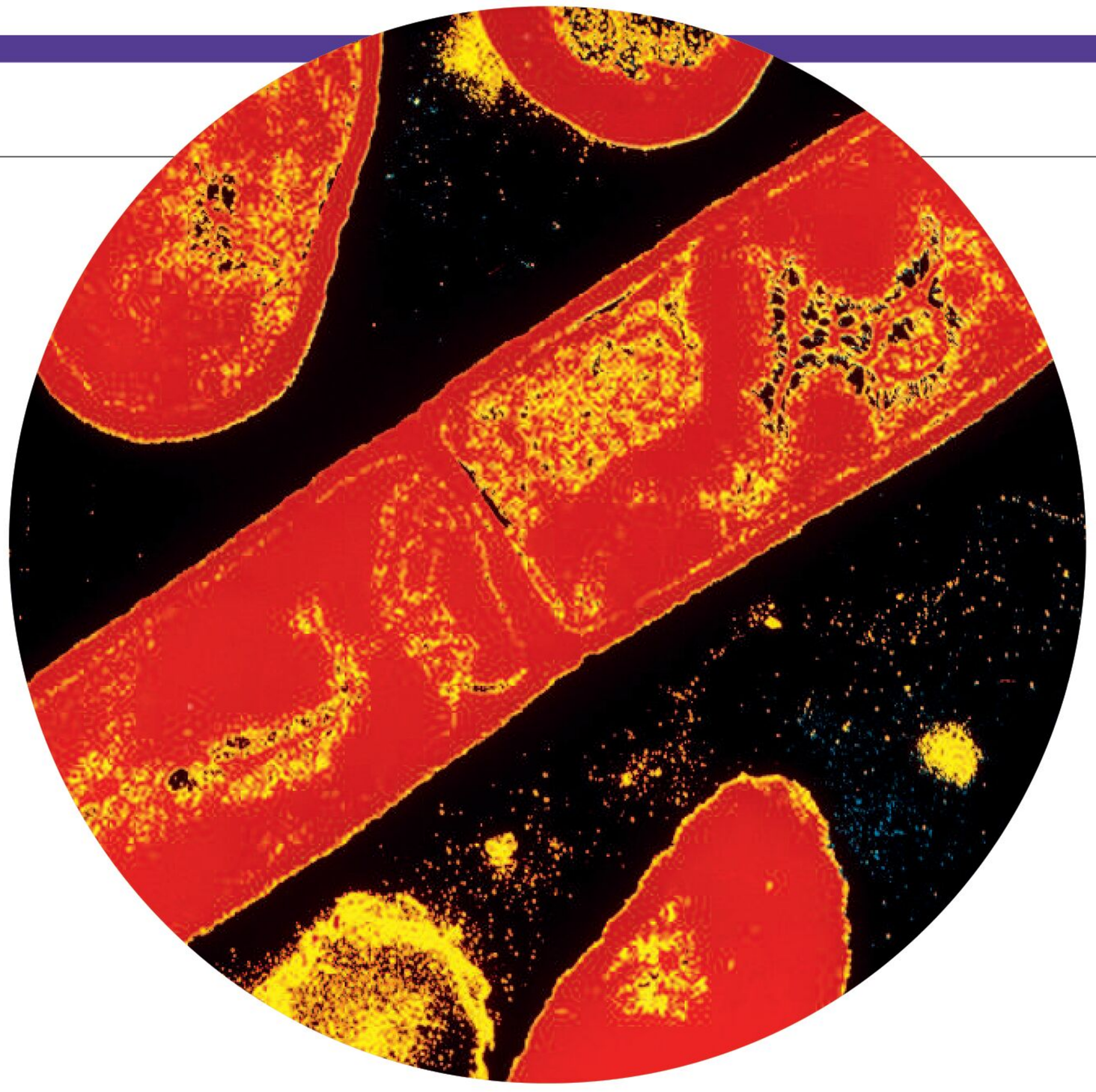
teurs », reconnaît Jérôme Soyer, directeur avant-vente Europe chez l'éditeur de logiciel de sécurité américano-israélien Varonis. L'étude du Clusif le confirme, même si elle pointe certains progrès : programmes de sensibilisation à la sécurité informatique, régression du « BYOD » (*Bring your Own Device*, c'est-à-dire l'usage professionnel de matériel informatique personnel), droits d'accès mieux gérés… En revanche, les capacités de détection laissent encore à désirer comme l'analyse des incidents par les équipes informatiques.

Villes et régions sont aussi prises dans une tendance à la hausse de la cybercriminalité, accentuée par l'effet d'aubaine créé par le recours massif au télétravail en raison de la pandémie de Covid-19. « *On a ouvert les vannes dans un contexte d'urgence et les gens se sont mis à partager un peu tout, en se connectant de manière pas toujours sécurisée* », constate Jérôme Soyer. Et la population des attaquants — du simple amateur au groupe organisé — a évolué grâce à une cybercriminalitéfonctionnant comme un « service payant » : « *Des équipes de hackers scannent tout Internet pour trouver des vulnérabilités*, explique Gérôme Billois, associé de la société de cybersécurité Wavestone, *d'autres réalisent les attaques en s'affiliant à des fournisseurs de* ransomware, *par exemple, qui prennent une commission de 30 % sur les gains de l'attaque.* » Dans ce contexte, l'Anssi s'est associée à l'Association des maires de France pour publier début décembre 2020 un guide de la cybersécurité destiné aux communes et intercommunalités. Une trentaine de recommandations y figurent. « *La cybersécurité n'est pas qu'une question de technique*, continue Éric Hazane, *mais aussi de gouvernance, de processus de décision, de prises de conscience des risques et des enjeux.* »

Le cas sensible des « villes intelligentes »

Parmi les risques figurent notamment ceux liés à l'émergence des « smart cities » : les villes « intelligentes », gérées par les données, bardées de capteurs et d'objets connectés. « *Il n'y a pas de grandes différences entre un système d'information complexe et un quartier intelligent : c'est un ensemble de briques technologiques* », note Éric Hazane. Sur le terrain, il n'existe pas ou peu d'exemples encore (Toronto, au Canada, a refusé un tel projet de Google), mais l'Anssi s'y intéresse. Ainsi que les professionnels du bâtiment, de l'énergie et des technologies (Saint-Gobain, Schneider Electric, Bouygues Énergie, SFR, IBM, Vinci, Eiffage, Google Cloud…) réunis au sein de la Smart Building Alliance pour aborder les aspects sécurité dès la phase de conception des projets.

En espérant ainsi qu'être pris de court par les cybercriminels ne reste pas une fatalité. En réaction à de nouvelles attaques contre des hôpitaux, le gouvernement a d'ailleurs annoncé le 18 février vouloir investir un milliard d'euros supplémentaire pour faire monter le niveau général de protection. ■ **Arnaud Devillard** @A_Devila



DR TONY BRAIN/SPL/PHANIE

◀ **« Bacillus subtilis »,** la plus commune des bactéries, coordonne son rythme avec la lumière ambiante (vue au microscope ectronique).

Les bactéries sont toujours à l'heure

Comme les humains, « Bacillus subtilis » possède une horloge circadienne. Cette découverte pourrait permettre, par exemple, d'améliorer l'efficacité d'un médicament ou la qualité d'une lessive.

Selon qu'il fait jour ou nuit, les rythmes biologiques des animaux diffèrent. Température corporelle, sécrétions hormonales, activités métaboliques et cérébrales fluctuent en fonction du moment de la journée en réponse aux instructions de l'horloge circadienne. Tous les animaux, et en premier lieux les humains, possèdent dans leurs cerveaux une structure qui anime l'organisme selon divers rythmes.

Et les bactéries, alors ? Les scientifiques pensaient que la plupart en étaient dépourvues. Or, une étude publiée dans *Science Advances* par une équipe de chercheurs de plusieurs universités européennes bouleverse totalement nos connaissances sur le sujet. Pour la première fois, ils ont découvert que la plus commune des bactéries, *Bacillus subtilis*, celle utilisée pour produire des antibiotiques par les laboratoires pharmaceutiques, pour fabriquer du pain industriel ou bien encore pour renforcer l'efficacité des détergents, possède bien une horloge circadienne !

Tels des chefs d'orchestre, les horloges circadiennes des organismes vivants ponctuent le temps qui passe par la régulation des différentes fonctions biologiques. Chez l'humain, l'horloge circadienne se situe dans son hypothalamus. 20 000 neurones y travaillent de conserve pour rythmer les journées et les nuits du corps et du cerveau, et se synchroniser avec la lumière ambiante. Avec bien moins de moyens à leur disposition, il apparaît que les bactéries sont capables de prouesses équivalentes.

Une meilleure connaissance des rythmes biologiques

Pour être tout à fait exact, on connaissait déjà certaines bactéries douées de telles propriétés : les bactéries photosynthétiques et notamment les cyanobactéries (également appelées « algues bleues »). Logique, puisque celles-ci ont besoin de lumière pour survivre, en la transformant, comme les plantes, en énergie chimique. D'ailleurs, c'est pour la même raison que les végétaux sont également dotés d'une horloge circadienne. Mais, jamais avant, on n'avait suspecté qu'une banale bactérie du sol puisse en faire autant. Ce qui n'est pas sans conséquences si l'on se rappelle qu'au moins 15 % de tous les êtres vivants sur Terre sont justement des bactéries.

Au-delà de son aspect fondamental et d'une meilleure compréhension des mécanismes des rythmes biologiques, cette découverte pourrait avoir quantité de répercussions. Comme donner la possibilité aux industriels d'améliorer la qualité ou la quantité d'un médicament ou d'une lessive, en optimisant simplement la lumière en fonction des rythmes de vie des bactéries. ■

Hervé Ratel

D'improbables planètes « barbes à papa » parsèment le ciel

Ces astres vaporeux restent une énigme pour les astronomes. L'observation de l'un d'entre eux pourrait aider à mieux comprendre la formation de toutes les planètes.

Avec une densité comparable à celle d'une « barbe à papa », des planètes ayant la taille de la géante gazeuse Jupiter pour une masse dix à cent fois inférieure ne devraient même pas exister. Et pourtant, les astronomes viennent d'en confirmer une nouvelle ! WASP-107b, qui tourne autour d'une étoile située à 212 années-lumière de la Terre, est la dernière candidate au titre de « super-enflée ». Elle aurait en effet un rayon presque aussi important que celui de Jupiter pour une masse d'à peine 0,09 fois la sienne.

« *Ces planètes sortent du lot statistique. Il y a dix ans, personne n'aurait cru à leur existence. Mais aujourd'hui, on dispose de mesures précises qui permettent d'en attester. La vraie question est : que sont-elles ?* », s'interroge Jean-Michel Désert, astrophysicien à l'institut d'astronomie Anton-Pannekoek, à Amsterdam (Pays-Bas). Percer leurs secrets permettrait de mieux comprendre les mécanismes de formation planétaire en posant de nouvelles contraintes théoriques.

C'est en 2014 que les astronomes se sont aperçus que les trois exoplanètes tournant autour de l'étoile Kepler-51, à 2500 années-lumière de la Terre, possèdent des caractéristiques inhabituelles : un rayon compris entre 0,6 à 0,8 fois celui de Jupiter pour quelques dizaines de masse terrestres à peine. Avec une densité de 0,1 g/cm^3, elles sont effectivement aussi « vaporeuses » que les fameuses confiseries des fêtes foraines.

Rien de semblable n'a été repéré dans la Voie lactée

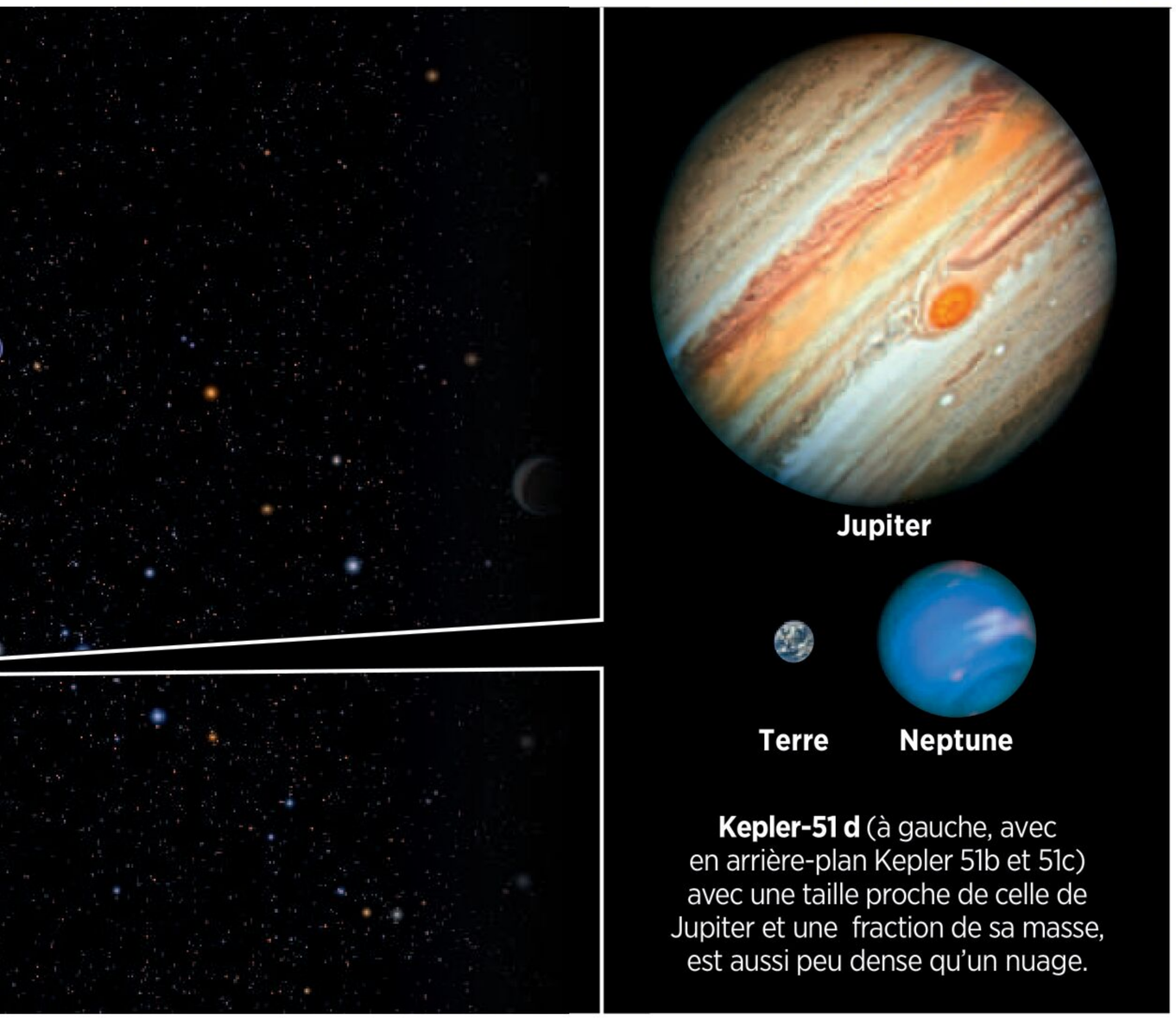
Rien de semblable n'existe dans le Système solaire ni n'avait été jusqu'alors repéré dans la Voie lactée. Pour scruter ces étranges objets, les scientifiques ont mobilisé le télescope spatial Hubble. Mais ils sont restés sur leur faim car l'instrument américano-européen ne leur a pas permis d'en préciser la composition. C'est que les deux planètes se sont révélées presque insondables. En cause, « *la présence, dans la haute atmosphère, d'une couche d'opacité provoquée par des mécanismes photochimiques*, explique Jean-Michel Désert. *Un phénomène qui se produit aussi sur Titan dont la surface est restée longtemps cachée.* » Heureusement, les scientifiques avaient identifié une autre piste : WASP-107b, dont l'étude complète vient de paraître dans *The Astrophysical Journal*. Cette fois, Hubble a révélé la présence de vapeur d'eau dans son atmosphère, ainsi qu'un manque de méthane encore inexpliqué.

Aujourd'hui, une quinzaine d'exoplanètes sont candidates au titre de « super-enflée », terme malsonnant et pourtant officiel. Mais si cette courte liste réunit des astres similaires à l'observation, leur structure et donc les mécanismes de leur formation pourraient bien différer. « *Il semble que les quelques planètes super-enflées*

CAROLINE PIAULET

« Les quelques planètes super-enflées que nous connaissons semblent toutes uniques »

Caroline Piaulet, Institut de recherche sur les exoplanètes de Montréal (Canada)



Kepler-51 d (à gauche, avec en arrière-plan Kepler 51b et 51c) avec une taille proche de celle de Jupiter et une fraction de sa masse, est aussi peu dense qu'un nuage.

NASA, ESA, AND L. HUSTAK, J. OLMSTED, D. PLAYER AND F. SUMMERS (STSCI)

que nous connaissons soient toutes uniques et résultent de conditions de formation ou d'irradiation très particulières », affirme Caroline Piaulet, de l'Institut de recherche sur les exoplanètes de l'université de Montréal (Canada). La chercheuse a étudié la structure interne de WASP-107b, et a pu mesurer la masse de son cœur, qui ne dépasse pas cinq fois celle de la Terre. « *C'est une surprise car on pensait jusque-là que la formation d'une géante gazeuse requérait un cœur solide d'environ dix fois la masse de la Terre. Il nous faut donc un nouveau scénario pour expliquer ces planètes* », précise-t-elle. De fait, elles doivent accumuler de grandes quantités de gaz, mais le processus d'accrétion sur le cœur rocheux doit stopper rapidement, sans quoi elles deviendraient aussi massives que les géantes gazeuses du Système solaire.

Tout se joue donc au sein des disques protoplanétaires, ces structures éphémères de gaz et de poussières qui entourent les jeunes étoiles. Pour obtenir suffisamment de gaz, les super-enflées doivent se former dans la partie externe de ces disques, loin de l'étoile centrale, là où cette ressource est abondante. « *Mais celles que nous observons sont pourtant toutes très proches de leur étoile* », s'étonne Jean-Michel Désert. Seule explication possible : « *Elles ont dû migrer ultérieurement pour se trouver là où elles sont actuellement* », imagine le spécialiste. De tels déplacements peuvent en effet être induits par des perturbations dues à la présence d'une autre planète.

La proximité de leur étoile interroge aussi sur leur devenir : ne vont-elles pas être soufflées par les vents stellaires et se retrouver mises à nu ? Pour les trois premières observées, celles gravitant autour de Kepler-51, c'est plus que probable car elles perdent chaque seconde des tonnes de matière. D'ici à environ un milliard d'années, la plus proche aura l'aspect d'une mini-Neptune, un astre bien plus petit et chaud. En revanche, explique Caroline Piaulet : « *À la vitesse à laquelle l'enveloppe de WASP-107b s'érode, seuls quelques centièmes de la masse totale de l'atmosphère seront perdus d'ici à la fin de vie de l'étoile. Elle devrait donc demeurer super-enflée pour encore quelques milliards d'années.* » ■

Joël Ignasse @IgnasseJ

AURÉLIEN ALVAREZ

PAR AURÉLIEN ALVAREZ *

Qu'est-ce qu'une exponentielle ?

À en croire certains, la dette de la France serait « exponentielle ». Ces derniers mois, nous avons entendu dire à maintes reprises que la propagation d'un certain virus était elle aussi « exponentielle ». Mais que signifie exactement ce terme et a-t-on raison de s'en inquiéter comme cela semble être l'effet attendu ? En fait, bien des commentateurs utilisent cet adjectif pour qualifier une croissance forte à leurs yeux. Or en mathématiques, une croissance exponentielle est une croissance bien précise : c'est une notion quantitative et non un simple qualificatif qualitatif. Alors que se cache-t-il vraiment derrière une exponentielle ? Deux paramètres : une échelle de temps et un facteur multiplicatif qu'on appelle la base de l'exponentielle. Imaginons par exemple qu'une personne infectée par un virus en contamine deux autres chaque jour : l'échelle de temps est ici le jour et le facteur multiplicatif vaut deux. Est-ce préoccupant ?

> « En mathématiques, une croissance exponentielle est une croissance bien précise : c'est une notion quantitative et non un simple qualificatif qualitatif »

Si une seule personne est initialement malade, c'est l'équivalent de toute la population française qui sera contaminée au bout de 25 jours et l'équivalent de la population mondiale après 32 jours ! Même si, dans la réalité, la croissance exponentielle s'accompagne en général d'une échelle de temps plus grande — par exemple de l'ordre de la semaine — on comprend facilement qu'il est possible d'atteindre très vite des chiffres vertigineux si rien n'est fait ! Si les histoires de virus vous ennuient, voici une autre illustration. Imaginez qu'on vous propose un emploi respectable d'une durée d'un mois, rémunéré sur la base suivante : un centime d'euro le premier jour puis le salaire est doublé chaque jour. En acceptant, vous devriez être à l'abri du besoin pour un petit moment...** ■

* Professeur à l'ENS de Lyon
** Pour un mois de 30 jours, le salaire final atteindra près de 11 millions d'euros (2^{30}-1 centimes).

À Fukushima, le chantier du siècle

Dix ans après l'explosion de plusieurs réacteurs de la centrale nucléaire japonaise, le démantèlement et la décontamination des installations affrontent d'immenses défis. La remise du site entier dans son état naturel n'est pas envisageable avant 2070.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau **et Rachel Mulot** @RachelFleaux

Le 11 mars 2011, un tsunami dévastait la côte pacifique de la région du Tōhoku au Japon. Plus de 18 000 personnes sont mortes ou disparues. 500 000 sont déplacées, car leur village n'existe plus, ou parce qu'elles sont les victimes collatérales d'un autre drame : l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima daiichi (Fukushima-I), ravagée par la mer. À quoi ressemble celle-ci dix ans plus tard ? Derrière les réacteurs accidentés, qui se dressent toujours face à l'océan, tout juste recouverts de sarcophages provisoires, le chantier est titanesque : des cuves par centaines, des centres de stockage du combustible irradié, des millions de tonnes de terre excavée... La facture des travaux dépassera les 170 milliards d'euros, soit le PIB de la Nouvelle-Zélande. Voici la situation actuelle.

Des réacteurs sous haute surveillance

Aucun des six réacteurs n'est dans la même situation technique. Deux d'entre eux — les 2 et 3 — ont fondu à la suite du tsunami. Trois — les 1, 3 et 4 — ont été le siège d'une explosion d'hydrogène qui a soufflé les bâtiments. Les réacteurs 5 et 6, situés plus en hauteur et à l'arrêt au moment du drame, n'ont pas été touchés par la catastrophe. Depuis le 11 mars 2011, l'exploitant Tepco lutte sans cesse pour maintenir la température des cœurs fondus autour de 30 °C en les arrosant constamment d'eau douce. Les risques de nouvelles explosions d'hydrogène sont désormais écartés grâce à

Le gouvernement va devoir prendre une décision cruciale : autoriser ou non le rejet d'une partie des eaux traitées dans la mer

MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Usines de décontamination

Avant le stockage ou la réinjection des eaux dans les réacteurs, des unités filtrent d'abord le césium et le strontium, puis d'autres usines filtrent 62 radionucléides (ruthénium, cobalt)..

Réacteurs 1 à 4

Seule la piscine de refroidissement stockant les combustibles usés du réacteur 4 est vidée. Le retrait des gravats et du combustible est en cours dans les trois autres *(voir l'écorché)*. Des recherches se poursuivent pour localiser le cœur fondu (corium).

Centres de traitement et d'entreposage des déchets

Gravats, décombres, matériels y sont traités puis entreposés.

Piscine commune

Elle est située à une dizaine de mètres du sol et peut contenir 3823 m^3.
Le combustible retiré des piscines des réacteurs y est entreposé.

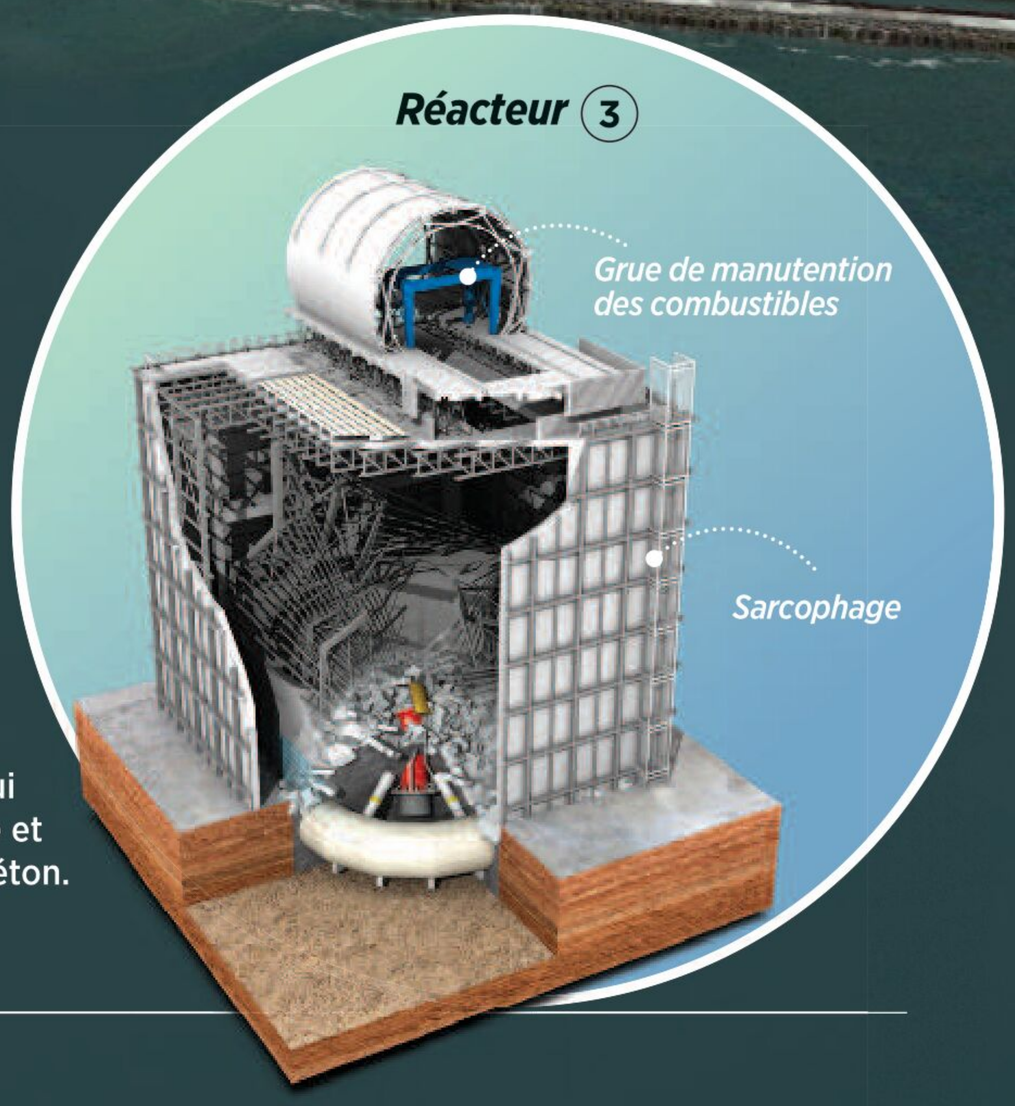
Mur de glace

Long de 1,5 km, profond de 30 m, il prévient les infiltrations dans la nappe souterraine et limite les fuites d'eaux radioactives.

Mur imperméable en front de mer

Long de 900 m, il retient les eaux souterraines contaminées en amont, afin de les pomper.

Dans les réacteurs endommagés, des grues débarrassent les gravats et ôtent les combustibles usés des piscines. Des robots travaillent à localiser le cœur fondu (en rouge) qui a percé la cuve et les fondations en béton.



SOURCES : TEPCO. IRSN. AIEA. COMMISSION DE RÉGLEMENTATION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DU JAPON OU NRA JAPAN)

ÉPIDÉMIOLOGIE

Des conséquences sanitaires difficiles à évaluer

En utilisant les enseignements de la catastrophe de Tchernobyl en 1986, les autorités japonaises ont recherché en priorité une augmentation des cancers de la thyroïde chez les enfants.

Du point de vue sanitaire, quelle est l'ampleur de la catastrophe de Fukushima ? Dix ans après, force est de constater qu'avec les données disponibles, il est difficile de répondre. Pourtant, les 2 millions d'habitants de la préfecture se sont vu proposer un suivi sanitaire. Mais, dans les faits, ils furent libres de collaborer ou non à l'enquête épidémiologique menée par les autorités japonaises. Et c'est à peine un quart environ (567 000 personnes) qui ont répondu sur la durée aux questionnaires. « *Depuis 2011, le taux de participation n'a cessé de baisser ce qui semble indiquer une moindre inquiétude des personnes évacuées* », précise Enora Clero, épidémiologiste à l'IRSN, qui participe au programme de suivi des populations avec les autorités sanitaires japonaises.

MSTYSLAV CHERNOV/ AP/ SIPA

Provoqués par l'iode radioactif, plus de 6000 cas de cancer de la thyroïde ont été observés chez des enfants en Biélorussie, en Ukraine et en Russie après 1986.

Parmi ces personnes, 38 % ont été exposées à des doses supérieures à 1 millisievert (mSv), le seuil maximal annuel recommandé par la Commission internationale de protection radiologique et 0,005 % ont reçu une dose supérieure à 15 mSv. Les autorités ont recherché en priorité une augmentation des cancers de la thyroïde chez les enfants. « *Cette vigilance provient des enseignements de la catastrophe de Tchernobyl en 1986*, explique Enora Clero. *Grâce aux registres des cancers tenus en Ukraine, Biélorussie et Russie, les scientifiques avaient pu mettre en exergue une augmentation de cette affection conduisant à une ablation de la thyroïde chez les jeunes de moins de 18 ans exposés à la radioactivité.* » Plus de 330 000 enfants ont été suivis dès 2014 — la maladie mettant au moins trois ans pour se déclarer. Mais pour exploiter les résultats, les médecins se sont heurtés à un obstacle de taille : le Japon ne tenait pas jusque-là de registre des cancers. Pas de point zéro donc pour détecter une recrudescence des cas. 141 000 enfants se sont vu détecter des nodules ou kystes sur la thyroïde, cette affection fréquente la plupart du temps bénigne. Mais 18 enfants ont été confirmés porteurs d'anomalies potentiellement malignes et 13 ont dû subir une ablation chirurgicale. « *Nous sommes passés d'un taux de prévalence de 39 cas pour 100 000 enfants en 2014 à 6 cas en 2020* », commente Enora Clero. Pour interpréter ces chiffres, les chercheurs ont mené une campagne de dépistage massif dans une autre région du Japon non touchée par la catastrophe. Les taux se sont révélés similaires. Quant aux recherches sur d'autres maladies possibles (cancers, leucémies, troubles hépatiques), elles n'ont pour l'instant rien révélé d'anormal non plus.

S'il faudra attendre encore des années pour tirer des conclusions définitives, d'après ces résultats préliminaires, l'impact sanitaire de l'explosion des réacteurs nucléaires de Fukushima-Daiichi ne serait donc pas comparable à celui de Tchernobyl en avril 1986. En effet, des cancers de la thyroïde continuent de se déclarer jusqu'à aujourd'hui chez des individus qui ont subi les rayonnements de la catastrophe soviétique dans leur jeunesse. L'explication tient peut-être aux différences de matériaux radioactifs inhalés par les populations lors des deux catastrophes, très différentes tant en raison de la conception des réacteurs impliqués que des circonstances de l'accident et des mesures d'éloignement des populations, qui ont tardé en Ukraine. **L. C.**

▸ des systèmes permettant d'injecter au besoin de l'azote chimiquement neutre. Des circuits de secours électriques ont été installés pour parer à toute panne. Les piscines d'entreposage de combustible usé situées à côté de chaque réacteur sont également maintenues à des températures inférieures à 30 °C.

Le casse-tête du démantèlement

Pour Tepco, la phase de démantèlement a officiellement commencé en 2013. C'est cette année-là en effet qu'ont débuté les travaux d'évacuation du combustible usé de la piscine du réacteur 4, laquelle était pleine à 97 % avec 1300 éléments qu'il a fallu retirer et stocker dans une nouvelle piscine sur le site. Cette phase s'est achevée en décembre 2014. L'enlèvement du combustible usé du réacteur 3 pourrait s'achever ce mois de mars. Restent les réacteurs 1 et 2, où le retrait est annoncé pour 2023.

Puis il faudra enlever les cœurs fondus (corium) des réacteurs 2 et 3. La radioactivité y est très forte si bien que personne ne sait quelle consistance ont ces matériaux. « *À Tchernobyl, le corium est compact et durci mais il est possible que cela soit dû aux sacs de sable et autres matériaux solides qui ont été projetés sur le réacteur par hélicoptère pour stopper les émissions de particules radioactives*, suppute Patrice François, ingénieur à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). *À Fukushima, l'injection d'eau a peut-être conduit à un résultat différent.* » Le 13 février 2019, un robot muni d'une caméra a pu arriver au contact du corium du réacteur 2. Selon les premiers constats, il semble que la matière fondue soit friable. Les premières images montrent par ailleurs que le combustible nucléaire a traversé sa cuve pour pénétrer les fondations en béton (radier). Le 26 janvier 2021, l'autorité nucléaire japonaise a révélé un nouvel obstacle : de très forts taux de radioactivité dus à du césium 137 affectent les dalles de 12 mètres de diamètre composées de trois couches de béton qui couvrent les cœurs fondus des réacteurs 2 et 3. De quoi peut-être repousser la date de la fin des travaux de décontamination prévue pour 2031. Dans tous les cas, Tepco estime que la remise du site entier dans son état naturel devrait durer devrait durer des dizaines d'années, pour se terminer aux alentours de 2070.

Rejeter en mer l'eau dépolluée ?

L'arrosage permanent des cœurs fondus pour les refroidir permet également d'empêcher leur enfoncement dans le sol sous l'effet de la chaleur ainsi que la dispersion de radionucléides dans l'atmosphère. Mais pour chaque réacteur, il faut apporter pas moins de 5000 litres d'eau par heure. De l'eau qui est ensuite récupérée, pour être partiellement décontaminée avant d'être stockée. Pour réussir cette récupération, Tepco a étanchéifié le site en 2016 en congelant la terre afin d'obtenir un « rempart » de sol congelé. Par ailleurs, face à la mer, un mur long de 900 m et haut de 35 m empêche les écoulements. Problème, depuis dix ans, l'eau traitée ne cesse de s'accumuler dans des réservoirs. Au 21 janvier 2021, ce sont très exactement 1 240 731 m^3 d'eau traitée qui étaient entreposés dans plus d'un millier de cuves ! Faute de pouvoir s'étendre indéfiniment, le site va arriver à saturation d'ici à 2022. À l'été prochain, le gouvernement japonais prendra une décision cruciale : autoriser ou non le rejet dans l'océan d'une partie de cette eau. « *Le strontium, le césium et la plupart des radionucléides ont été éliminés par les systèmes de dépollution* », assure Patrice François. Mais il reste encore du tritium. Pour le chercheur, « *l'eau pourrait être rejetée en mer sans grandes conséquences écologiques ; la décision est politique plus que technique* ». Le rejet dans la mer est vivement contesté par les associations écologistes, les pêcheurs et les populations riveraines. Mais que faire sinon ? L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) estime que faire s'évaporer l'eau est une autre voie techniquement faisable, le tritium étant un gaz très volatil. Reste qu'il est difficile de modéliser sa dispersion dans l'atmosphère et les conséquences possibles sur l'environnement.

L'onde de choc

La réhabilitation du site demandera **40 ans de travaux.**

Son coût sera de **170 milliards d'euros.**

470 000 personnes ont été déplacées dans la préfecture de Fukushima. Leur retour est toujours en cours.

Un chantier mondial a été lancé pour renforcer la sûreté des centrales nucléaires. Coût indéterminé.

Décontaminer la terre

Dans le voisinage de la centrale, le nettoyage des « zones de décontamination spéciale », où les teneurs en radioactivité dépassaient les 20 millisieverts (mSv), a été terminé en 2018. Ces travaux qui ont coûté près de 25 milliards d'euros ont consisté à racler une croûte de 5 cm sur les terres agricoles, ce qui a réduit sensiblement la pollution. 17 millions de mètres cubes de déchets de végétaux et de sols ont ainsi été produits. Mais rien n'a pu être entrepris dans les forêts et zones naturelles où le nettoyage détruirait les écosystèmes. ▸

TOMOHIRO OSHUMI / GETTY IMAGES / AFP

Le retrait du combustible usé du réacteur 3 devrait être achevé en mars. Reste celui des réacteurs 1 et 2 dont l'enlèvement devrait être terminé en 2024 (ici des ouvriers du chantier revêtant leur tenue de protection).

Le retour des populations

À Fukushima, la moitié des personnes vivant dans les zones les plus polluées ont choisi de ne pas revenir, bien que le gouvernement japonais incite fortement à la réinstallation. L'étude sociologique franco-japonaise Shinrai menée conjointement par l'IRSN, l'Institut d'études politiques de Paris et l'université de Technologie de Tokyo a montré à quel point les vies des habitants de la préfecture de Fukushima ont été perturbées. Certaines personnes veulent revenir et oublier au plus vite l'épreuve. Ce sont principalement des personnes âgées. Elles refusent les mesures de radioprotection et veulent « vivre comme avant ». Mais une autre partie des volontaires au retour le fait en suivant scrupuleusement les consignes de radioprotection. Une troisième catégorie regroupe des « revenants » peu certains de leur choix et anxieux qui décident de rentrer soit par attachement, soit pour le travail. Enfin, les derniers n'acceptent qu'un retour partiel pour travailler, et continuent à vivre en dehors de la zone contaminée.

Sécurité renforcée en France

Depuis la catastrophe, les centrales nucléaires du monde entier sont en chantier pour éviter le scénario de Fukushima. Aucune agence n'est capable de préciser l'état d'avancement des travaux ou les montants engagés, mais la facture atteindrait plusieurs centaines de milliards d'euros. En France, EDF estime ainsi qu'il lui en coûtera 10 milliards d'euros, en sus des 40 à 50 milliards indispensables pour prolonger ses 56 réacteurs jusqu'à 60 ans. Car l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a, après Fukushima, exigé des mesures pour renforcer la sûreté des sites hexagonaux. Il s'agit notamment de sécuriser les approvisionnements en électricité et en eau qui permettraient d'arroser le combustible, en cas de fusion du cœur.

Mi-février, la centrale de Paluel (Normandie) a été la dernière à être équipée d'un bunker avec un « Diesel d'ultime secours », palliant toute panne de courant. « *Les bâtiments de crise, ou ceux qui protègent les sources d'électricité ou d'eau, doivent désormais pouvoir essuyer sans dommages les pires tornades, inondations ou séismes possibles dans leur région* », explique Rémi Catteau, directeur des centrales nucléaires à l'ASN. Alors, partout, on construit des coques de protection, on surélève sur piliers, on bétonne en acier renforcé, on installe des tuyaux increvables, des prises d'eau, branchées sur les fleuves ou des citernes.

Pour les populations, le périmètre du plan particulier d'intervention (PPI), activé en cas de rejet de particules radioactives dans l'air, est passé de 10 à 20 km — ce qui correspond à la zone évacuée au Japon. Les personnels ont reçu une formation aux événements météorologiques extrêmes. Enfin, une Force d'action rapide du nucléaire (Farn) a été créée : 300 techniciens répartis sur cinq sites en France pour intervenir en moins de 24 heures sur n'importe quelle centrale nucléaire du parc français. ■

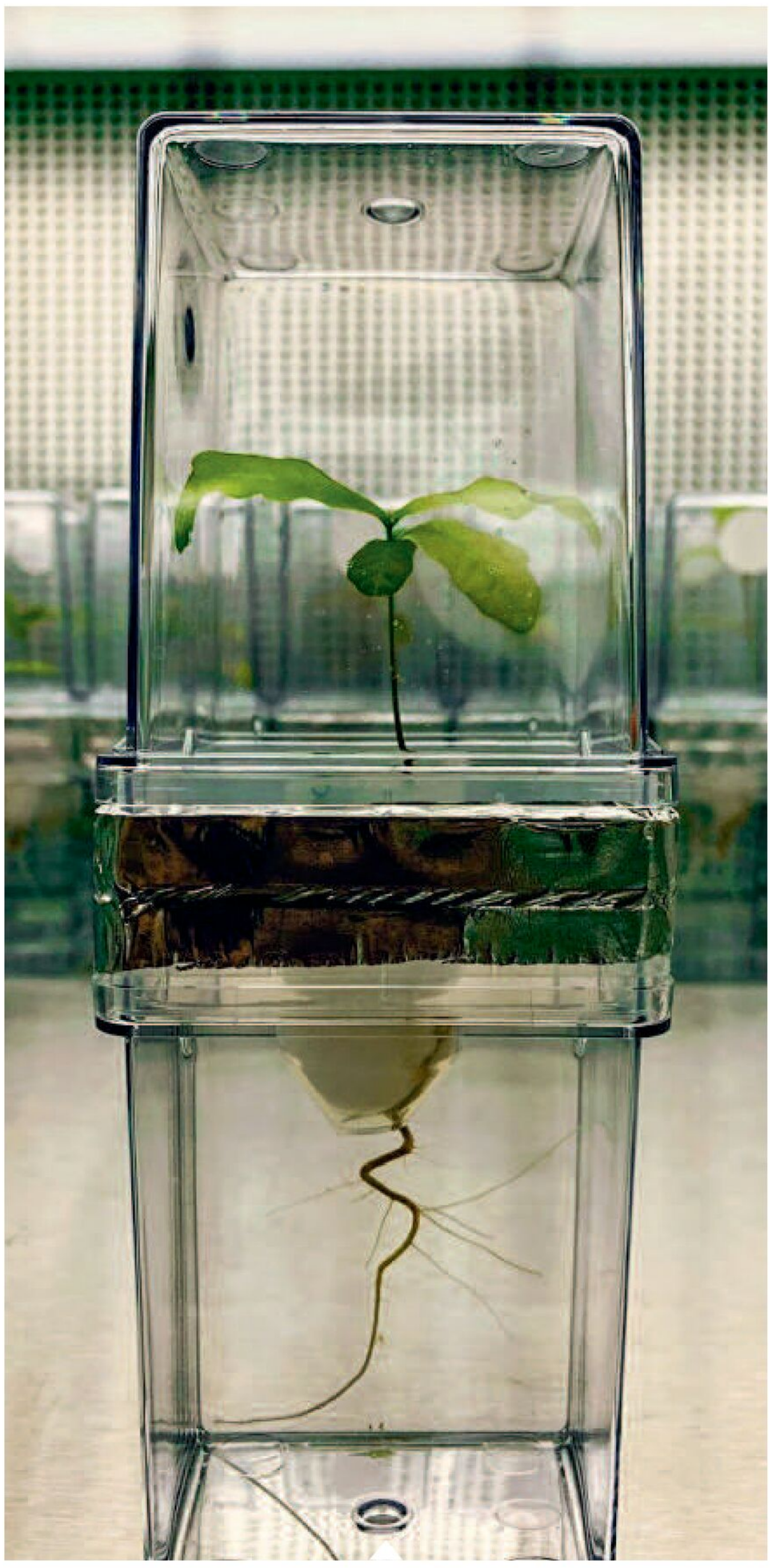
Certaines personnes, principalement âgées, veulent revenir et oublier au plus vite l'épreuve

Les végétaux peuvent transmettre leur microbiote

Une partie des micro-organismes, bactéries et champignons, présents chez le chêne est transmise à sa descendance par sa graine. Comprendre ce processus pourrait permettre d'améliorer la croissance et la santé des plantes en agissant sur le microbiote.

D'UNE GÉNÉRATION À LA SUIVANTE, certains végétaux ne transmettent pas que leurs gènes mais aussi bactéries et champignons. C'est une véritable nouvelle forme d'hérédité que des scientifiques de l'université de Stockholm (Suède) viennent de découvrir. « *Ce travail démontre qu'une partie du microbiote du chêne est transmis à sa descendance par sa graine* », explique Matthieu Barret, chercheur Inrae à l'Institut de recherche en horticulture et semences d'Angers (Maine-et-Loire). Ce microbiote s'ajoute ainsi, par des mécanismes qui restent à élucider, à celui qui provient de l'environnement.

Les chercheurs ont d'abord recensé génétiquement les micro-organismes présents dans l'embryon, mais aussi dans les ébauches de racines et de feuilles de la graine contenue dans le gland. Ils ont alors découvert que ces différentes parties hébergent des populations bactériennes et fongiques en grande partie distinctes. Après avoir mis en culture les glands dans un milieu stérile, ils ont retrouvé les mêmes microbiotes sur les racines et les feuilles de la plantule. Au total, pas moins de 70 espèces bactériennes et 51 de champignons étaient présentes dans la graine du gland et transmises aux différentes parties de la plantule après germination. « *Ce résultat confirme ce qui avait été entraperçu chez plusieurs familles de plantes telles que les graminées, les fabacées et les brassicacées*, détaille Matthieu Barret. *D'une façon générale, le rôle de ces micro-organismes est encore méconnu, mais plusieurs données suggèrent qu'ils pourraient protéger la plante de la sècheresse comme des attaques d'organismes pathogènes.* » Par exemple, selon une étude récente menée en Chine, la résistance de certaines variétés de riz à une bactérie pathogène installée dans leurs grains est due à la présence, également dans les grains, d'une autre espèce bactérienne capable d'enrayer la fabrication de sa toxine.



STOCKHOLM UNIVERSITY

70 espèces de bactéries et 50 de champignons sont déjà présentes dans la graine comme l'a montré la mise en culture en milieu stérile de glands ayant généré des plantules.

Cette piste pourrait éviter les traitements phytosanitaires

« *Comprendre les processus impliqués dans l'assemblage des microbiotes des plantes constitue donc une étape indispensable pour pouvoir, à terme, améliorer leur croissance et leur santé en ajustant la composition de leur microbiote* », espère le scientifique. Ces recherches permettent ainsi d'entrevoir de nouveaux moyens d'assurer un bon développement des plantes agricoles sans forcément recourir aux engrais ou à des traitements phytosanitaires. « *Pour l'instant on ne parle encore que de corrélations entre la composition du microbiote de la graine et la germination puis la levée des cultures*, tempère cependant Matthieu Barret. *Il s'agit maintenant d'établir de véritables relations de cause à effet.* » ■

Pierre Kaldy

Demain, les maisons seront en bois

Dès 2030, les habitations neuves seront conçues majoritairement dans ce matériau, le seul qui stocke du carbone au lieu d'en émettre. La lutte contre le réchauffement climatique passe en effet par l'adieu au béton.

« Une révolution ! » Le mot ne semble pas trop fort à Frank Hovorka, directeur technique et scientifique de la Fédération des promoteurs immobiliers (FPI). Pays du béton, la France se prépare à opérer sa mue vers le bois dans la construction, à l'instar de ce qui se pratique déjà en Amérique du Nord, Scandinavie, Russie ou Chine. Pour le ministère de la Transition écologique, dès la fin de cette décennie, les habitations neuves seront en effet principalement construites en bois, le seul matériau qui stocke du carbone au lieu d'en émettre. C'est la conséquence directe d'une nouvelle réglementation environnementale, la RE2020, présentée le 12 décembre 2020, qui promeut des changements profonds dans la construction des maisons individuelles et des immeubles d'habitation. Et ce n'est pas tout. Les besoins en chauffage et en climatisation devront plonger d'au moins 30 %. « *L'immobilier entre de plain-pied dans la lutte contre le changement climatique* », constate Frank Hovorka.

Retour en arrière. En 2012, un premier plafond draconien de consommation énergétique a été introduit en France, ce qui était une première au niveau européen. La dépense énergétique pour le chauffage dans les constructions neuves ne doit pas dépasser les 50 kilowattheures (kWh) par mètre carré et par an. Soit trois à quatre fois moins qu'auparavant. Cette recherche de la « basse consommation » par le renforcement de l'isolation et grâce à la performance des appareils (*lire l'encadré p. 58*) se double désormais d'une analyse de cycle de vie des matériaux de construction. En effet, « *sur une durée de vie de cinquante ans, les émissions de gaz à effet de serre se partagent à moitié entre la phase de construction et la consommation annuelle d'énergie* », rappelle Yann Dervyn, directeur du collectif Effinergie qui regroupe les acteurs de la construction économe. Dès lors, comment nos habitations vont-elles devoir évoluer ? Car une maison est constituée d'une infinité de matériaux : béton des fondations, bois de la charpente, parpaings, planches des murs, PVC et verre des fenêtres, plâtres, enduits, etc. Pour calculer son empreinte carbone, les différents secteurs concernés ont donc évalué le « poids climatique » de chacun de leurs produits, de l'extraction de la matière première au recyclage en fin de vie.

JÉRÔMINE DERIGNY/ARGOS

Les immeubles d'habitation collectifs sont aussi concernés, comme ici, à la Ferme du rail, à Paris.

10 %
La part de marché actuelle des maisons à ossature bois.

3 %
du parc immobilier construit ou reconstruit tous les ans, un quart des bâtiments de 2050 ne sont donc pas encore construits.

25 %
des émissions françaises de gaz à effet de serre proviennent du bâtiment.

Tous les tests ont validé ses qualités de solidité

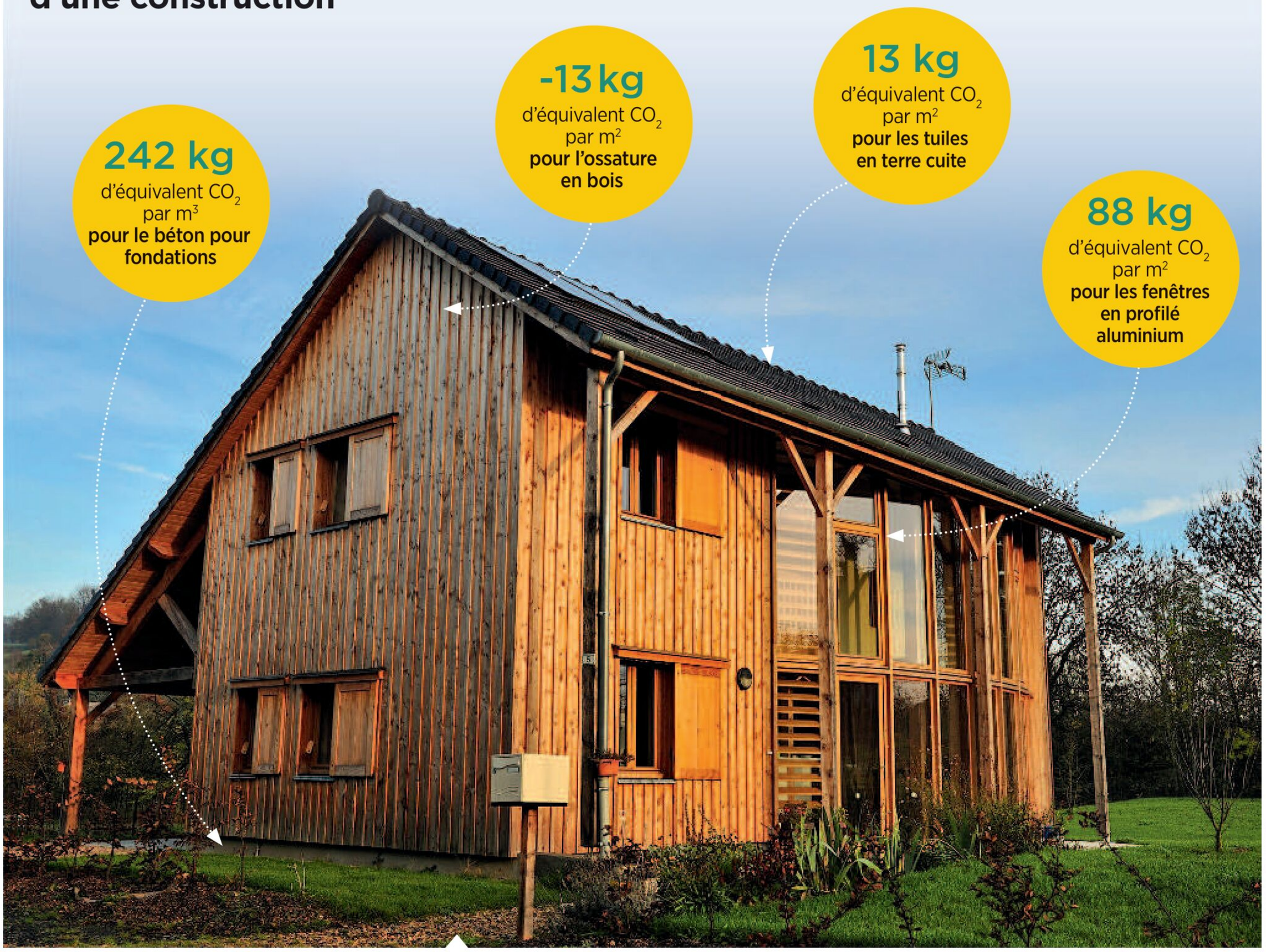
Ces hypothèses de calcul ont ensuite été validées sur 130 projets de construction dans une expérimentation baptisée « Énergie+Carbone- ». Conclusion : il existe une grande différence entre l'ossature bois et le béton. Selon les calculs de l'Agence de la transition écologique (ex-Ademe), la construction d'une maison individuelle (tous matériaux compris) émet aujourd'hui 425 kg de CO_2 par mètre carré. Un chiffre qui tombe à 144 kg en privilégiant le bois — ou d'autres matériaux peu émissifs en CO_2 comme la paille ou la terre. L'explication est simple : alors que la fabrication

MARC SCHOEFFTER

« Le bois utilisé pour la construction va stocker le carbone pendant au moins cinquante ans »

Marc Schoeffter, ingénieur au département Bâtiment et urbanisme de l'Agence de la transition écologique

Le poids climatique des divers éléments d'une construction



B.GOUHOURY/ANDIA.FR

Les émissions de gaz à effet de serre, principalement le CO_2, des matériaux de construction, sont mesurées par l'analyse de leur cycle de vie, de l'extraction de la matière première au recyclage.

du ciment exige de grandes quantités d'énergie, et celle du béton d'extraire du sable et granulats, le bois, lui, a un bilan climatique négatif puisque son usage dans une construction bloque pour des décennies le carbone capté naturellement par les arbres au cours de leur vie. « *On donne en outre une valeur plus importante au carbone au moment de la construction parce que le bois utilisé va le stocker pendant au moins 50 ans, durée de vie du bâtiment* », précise Marc Schoeffter, ingénieur au service Bâtiment et urbanisme de l'Agence de la transition énergétique. Rassurons-nous ! tous les autres matériaux ne vont pas disparaître pour autant : les fondations vont ainsi rester en béton pour d'incontournables questions de solidité et de stabilité.

Justement, cette évolution ne risque-t-elle pas de se faire au détriment des qualités structurelles des matériaux traditionnellement utilisés en construction dans l'Hexagone ? Une crainte légitime « *quand on a grandi avec l'histoire des Trois petits cochons et de leurs maisons en paille, en bois et en brique* », s'amuse Maxime Brard, fondateur d'Ecolocost, une société spécialisée dans la construction en bois. Une crainte que les expériences ont mise à mal. Tous les tests de validation ont en effet consacré la solidité du bois. Ainsi les essais de résistance mécanique menés par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), qui infligent aux pièces d'une ossature d'une maison des tests de flexion, d'arrachement, de traction, de dureté impliquant des vérins de 30 tonnes, montrent des performances similaires à celles du béton. De même, contrairement aux idées reçues, le bois et le béton offrent une réponse semblable au feu dans le cadre des normes anti-incendies (conçues

CHAUFFAGE

L'avenir est à la pompe à chaleur

Si l'isolation a déjà fait sa révolution avec sa généralisation dans le neuf et l'ancien, c'est au tour des appareils de chauffage de faire la leur : leur consommation doit diminuer de 30 % d'ici à dix ans. De complexes coefficients de performance énergétique vont amener au cours de la décennie à écarter le gaz naturel des maisons et immeubles neufs — fin des énergies fossiles oblige — pour favoriser le chauffage électrique. Mais pas n'importe lequel ! « *Les seuils de performance devront interdire le recours aux actuels radiateurs électriques dont les rendements énergétiques sont très mauvais au profit des pompes à chaleur* », table Marc Schoeffter. Ces systèmes thermodynamiques captent les calories d'une source froide extérieure pour les utiliser dans un logement grâce à un compresseur. C'est le même principe qu'un réfrigérateur mais inversé. Pour 1 kWh capté dans l'air extérieur, de 3 à 8 kWh, selon la performance de l'appareil, sont restitués dans l'habitation.

CPATRICK ALLARD/REA

Le système de chauffage capte les calories présentes dans l'air, le sol ou l'eau souterraine pour les redistribuer dans l'habitat.

- pour offrir une protection permettant l'intervention des pompiers et l'évacuation des habitants), car, dans un premier temps, le bois ne brûle qu'en surface.

Selon Ecolocost, qui a réalisé en seize mois un programme de 26 maisons individuelles commercialisé en 2019 à Villeneuve-Saint-Georges (Val-de-Marne), la dépense d'énergie pour une surface de 80 m² ne dépasse pas 300 à 500 euros par an alors que la moyenne du parc de logement actuel est de 1600 euros. « *Sur ces maisons bien isolées et bien orientées, ce n'est plus le chauffage qui coûte le plus cher, mais l'eau chaude et la consommation des appareils électriques* », explique Maxime Brard. D'où l'installation de panneaux photovoltaïques pour faire baisser la facture. Pour le promoteur, en revanche, les gains ne sont pas encore au rendez-vous : ce projet accuse une perte nette de 400 000 euros. « *En industrialisant tout au long de la chaîne, de la forêt à la maison finie en passant par les usines de montage des éléments, le surcoût va s'effacer* », assure néanmoins le promoteur. C'est cette augmentation des coûts que redoute la FPI. « *Il ne faudrait pas que la recherche de la performance énergétique fasse flamber le coût de la construction d'autant que les filières doivent adapter leurs chaînes d'approvisionnement et former leurs salariés à ces mutations* », prévient Frank Hovorka. Aussi la RE2020 prévoit-elle une transition progressive pour diminuer de 30 à 40 % les émissions de CO_2 d'ici à 2030 avec des renforcements des exigences prévus en 2023 et 2027. Reste une question : la France a-t-elle la ressource en bois nécessaire pour mener cette révolution à bien ? « *Oui, assure,* Dominique Cottineau, le délégué général de l'Union des industriels et constructeurs bois (UICB). *Notre secteur compte 300 entreprises qui emploient 40 000 personnes. La part de marché des maisons en bois est aujourd'hui de 10 % mais nous fournissons déjà charpentes, escaliers, terrasses, portes et fenêtres. Les machines sont là !* » La forêt française est de son côté sous-exploitée. « *Mais nous avons toute la décennie pour nous adapter à la nouvelle demande* », rassure Dominique Cottineau. ■

Loïc Chauveau @Loïc_Chauveau

CLIMATISATION

Comment résister aux canicules

La nouvelle réglementation environnementale dépasse la seule question de la facture de chauffage pour introduire un concept nouveau : le confort d'été. L'habitat devra désormais permettre de résister aux canicules qui seront de plus en plus fréquentes au cours du siècle. « *Il faudra concevoir autrement les logements, les faire traversant par exemple* [c'est-à-dire avec une double exposition pour pouvoir faire des courants d'air] *ou les doter de claustras et de persiennes, et bien les orienter pour éviter le rayonnement solaire direct afin que les occupants ne soient pas obligés d'aller acheter des climatiseurs* », prévient Frank Hovorka, de la Fédération des promoteurs immobiliers. Conséquence : la construction bois ne sera pas pertinente dans les régions les plus méridionales de France du fait de ses faibles performances en matière de maintien de la fraîcheur.

Les bienfaits paradoxaux de l'interdiction de la pêche

Dans les aires marines protégées, la tranquillité retrouvée des crustacés permet d'améliorer la reproduction et de reconstituer les stocks.

INTERDITES AUX PÊCHEURS, les aires marines protégées n'en sont pas moins bénéfiques à ces derniers. La preuve vient d'en être apportée par des scientifiques de l'université de Californie à Santa Barbara (États-Unis). Ils ont montré en effet que la tranquillité retrouvée des crustacés permet d'améliorer la reproduction et de reconstituer les stocks. Leur étude, publiée dans *Scientific Reports*, a porté sur deux zones situées au large de Santa Barbara qui ont été classées aires marines protégées en 2012. Les pêcheurs ont alors perdu 35 % des surfaces où ils pouvaient déposer leurs casiers à langoustes. Les chercheurs ont observé les nouvelles habitudes des professionnels et ont compilé leurs déclarations de prises transmises à l'administration de l'État de Californie.

Les résultats sont édifiants : les prises ont crû de 225 % entre 2012 et 2018 avec toujours plus de pêcheurs, puisque dans le même temps le nombre de bateaux a augmenté de 250 %. Pour s'assurer que les langoustes venaient bien de l'aire marine protégée, les chercheurs ont marqué 17 000 crustacés et demandé aux pêcheurs de les alerter en cas de prise. « *Nos données suggèrent que les aires marines protégées assurent des prises durables plus importantes* », estiment Hunter Lenihan et Dan Reed, auteurs de l'étude. Mais ils restent prudents, soulignant que leur résultat ne vaut que pour une espèce précise et sur une zone littorale particulière.

Prouver l'effet bénéfique des aires marines protégées exigera encore de nombreuses études. Mais ce résultat tombe à point nommé avant la quinzième réunion de la Convention internationale sur la biodiversité qui doit se tenir fin mai à Kunming, en Chine. Y sera notamment discuté un objectif de protection de 30 % de toute la surface des mers. ■

Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

A. MUSTARD / NATUREPL / EBPHOTO

Les prises de langoustes ont crû de 225 % malgré des aires de pêche réduites de 35 %.

UNIVERSCIENCE

PAR CHRISTOPHE CASSOU *
CHRONIQUE COÉCRITE AVEC CÉLINE GUIVARCH **

Le changement climatique dérègle l'horloge des saisons

2020 monte avec 2016 sur la plus haute marche des années les plus chaudes à l'échelle globale depuis 1850, soit le début des mesures instrumentales. En France, cette anomalie de température en 2020 dépasse déjà le seuil annuel de +1,5 °C. Ces changements de température moyenne se doublent de modifications dans le rythme des saisons qui affectent faune et flore, en particulier à nos latitudes. L'hiver est moins intense — 13 jours par an de gel en moins depuis 1960 en France — mais aussi plus court. Comment l'horloge saisonnière peut-elle se décaler alors que la durée de l'ensoleillement journalier, qui conditionne les saisons, est pilotée par des paramètres astronomiques ? La neige sur les sols en fin d'hiver retarde la bascule saisonnière, en réfléchissant davantage le rayonnement du soleil, localement mais aussi à distance. Ainsi, en Europe de l'Ouest, les mois de mars-avril froids sont en général associés à des coulées d'air frais venant de Sibérie au sol encore enneigé. Or, la fonte précoce due au changement climatique inhibe ce processus et explique en partie le fait que l'hiver se termine, météorologiquement parlant, 10 à 12 jours plus tôt qu'il y a 50 ans. Ce décalage entraîne des floraisons plus précoces, induisant une plus grande vulnérabilité aux épisodes de froid tardif, moins probables mais toujours possibles.

> « L'hiver se termine, météorologiquement parlant, 10 à 12 jours plus tôt qu'il y a 50 ans »

En outre, le déphasage temporel entre le développement plus précoce des insectes thermosensibles et les dates d'arrivée d'oiseaux migrateurs photosensibles — qui elles ne changent pas — peut aussi fragiliser en cascade les effectifs de nombreuses espèces.

Un changement climatique de 1,5 °C a déjà des effets très concrets sur les écosystèmes ; que penser d'un réchauffement de 3 à 4 °C qui réduirait en France l'hiver de 20 à 25 jours ? ■

* Directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.
** Directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

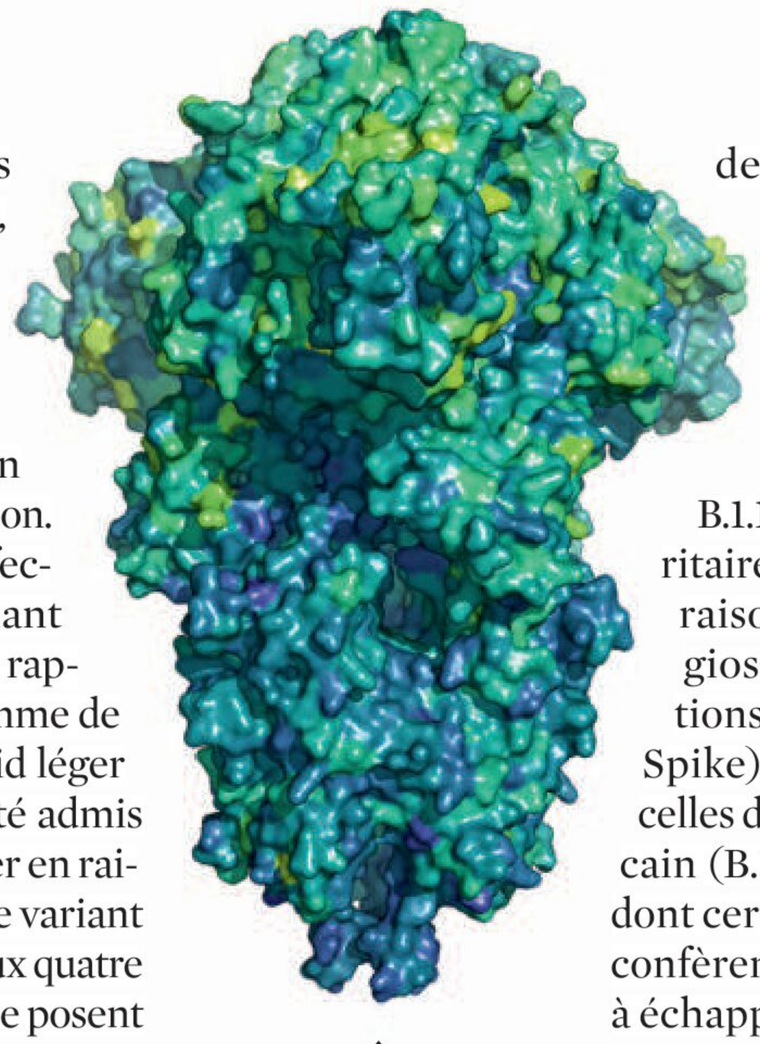
Les vaccins à l'épreuve des variants

Toutes les études convergent pour dire que les nouvelles souches du coronavirus tendent à réduire l'action des différents vaccins. Mais à quel point ? Quelles conséquences pour la campagne de vaccination ? Et comment réagissent les laboratoires ? Éléments de réponse.

Par Hugo Jalinière @HugoJaliniere

C'est à partir de Noël que les « variants » du coronavirus se sont implantés en France, responsables d'une part croissante des 15 000 nouvelles infections quotidiennes. Ainsi, alors qu'il n'y avait que quelques cas identifiés fin décembre en métropole, le variant anglais a été retrouvé dans environ 15 % des échantillons fin janvier et entre 25 % et 35 % à la mi-février (quand nous écrivons ces lignes). Le variant sud-africain, lui, représentait moins de 5 % des cas au même moment, mais déjà 33 % des tests en Moselle. Mieux adaptés à l'humain, ces coronavirus « mutants » font planer une menace sur l'efficacité de vaccins développés à partir de la souche initiale du Sras-CoV-2.

Le principe de tous les vaccins repose sur la présentation du même « morceau » de virus au système immunitaire : une version de la protéine de pointe Spike datant du début de la pandémie (*modèle 3D ci-contre*). Mais chez les nouveaux variants, des mutations ont pu modifier des petites zones de cette protéine, de sorte qu'elle échappe au pouvoir neutralisant de certains anticorps produits à l'occasion d'une vaccination ou d'une première infection. Le premier cas de réinfection grave dû à un variant en France a d'ailleurs été rapporté en février : un homme de 58 ans, atteint d'un Covid léger en septembre 2020, a été admis en réanimation en février en raison d'une infection par le variant sud-africain. Réponses aux quatre questions brûlantes qui se posent aujourd'hui.



Structure 3D de la protéine Spike. En jaune, les parties les plus à risque d'échappement immunitaire, en bleu foncé, les plus stables génétiquement.

BRIAN HIE/MIT CAMBRIDGE - UWE ZUCCHI/DPA/AFP - P. MACHADO MARTINEZ

Quels sont les variants actuels ?

Réputées plus contagieuses en raison d'une mutation (N501Y) qu'elles partagent, trois lignées virales sont en particulier surveillées. En France, depuis février, chaque test PCR positif doit ainsi faire l'objet d'une deuxième analyse pour déterminer le variant en cause dans l'infection. Selon les modèles, le variant « anglais », plus correctement désigné B.1.1.7, devrait devenir majoritaire en France dès mars en raison de sa grande contagiosité. Mais ses 23 mutations (dont 8 sur la protéine Spike) inquiètent moins que celles des variants dits sud-africain (B.1 351) et brésilien (P.1), dont certaines (E484K et K417) confèrent au virus une capacité à échapper en partie à des anticorps neutralisants.

Autre fait inquiétant, alors que ces différentes lignées virales entrent en compétition en France, des variants anglais porteurs de la mutation E484K ont déjà été trouvés au Royaume-Uni, suggérant un croisement viral. Et il faut s'attendre à voir d'autres lignées apparaître. Comme CAL.20C, partie de Californie, qui a touché en deux mois 19 États américains

Tous types de vaccins confondus, aucun décès du Covid-19 n'a pour l'instant été relevé chez une personne vaccinée.

et six pays (Australie, Danemark, Israël, Nouvelle-Zélande, Singapour, Royaume-Uni).

Les vaccins sont-ils efficaces ?

Tous vaccins et variants confondus, aucun décès du Covid-19 n'est survenu chez une personne vaccinée à l'heure où nous écrivons ces lignes. Cependant, en Afrique du Sud, l'utilisation du vaccin d'AstraZeneca a été suspendue en février à la suite d'une étude sur moins de 1800 personnes suggérant une efficacité de 22 % seulement sur le variant dit sud-africain (B.1 351). Très loin des 60 % à 70 % d'efficacité globale qui ont convaincu l'Organisation mondiale de la santé (OMS) d'homologuer le vaccin une semaine plus tard. Si les données sud-africaines doivent être complétées, toutes les études convergent pour dire que les vaccins perdent de leur efficacité face aux variants. Mais à quel point ? Sur le variant anglais B.1.1.7, l'échappement du virus aux anticorps est extrêmement limité et n'inquiète pas. En revanche, les deux autres variants B.1 351 et P.1 compliquent la donne, en particulier pour les vaccins dont l'efficacité initiale est moins élevée que celle des ARN messagers de Moderna et Pfizer.

Jusqu'ici pourtant. l'efficacité contre les hospitalisations semble flirter avec les 100 % quel que soit le vaccin ou le

ARSENAL

Quel vaccin pour quelle efficacité ?

Laboratoire	Pfizer-BioNTech (États-Unis/ Allemagne	Moderna (États-Unis)	AstraZeneca (Royaume-Uni)	Janssen (Belgique)	Novavax (États-Unis)	Spoutnik V (Russie)
Technique utilisée	ARN messager, 2 doses	ARN messager, 2 doses	Vecteur viral, adénovirus de chimpanzé, 2 doses	Vecteur viral, adénovirus humain 1 dose	Protéine recombinante	Vecteur viral, deux adénovirus, Ad5 et Ad26
Efficacité globale contre la souche initiale	95 %	94 %	70 %	66 %	95 %	92 %
Efficacité contre le variant « anglais » (B.1.1.7)	Diminution des anticorps non significative	Diminution des anticorps non significative	Diminution des anticorps non significative	Non testée	85 %	Non testée
Efficacité contre le variant « sud-africain » (B.1 351)	Baisse non significative selon le fabricant	Non chiffrée, nouveau vaccin en développement	Incertaine, nouveau vaccin en développement	57 %	60 %	Non testée

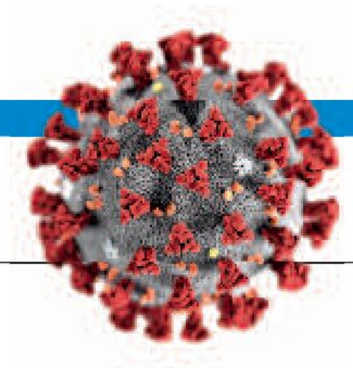
THOMAS KIENZLE / AFP - GENE J. PUSKAR/AP/SIPA - FRANK AUGSTEIN/AP/SIPA - J&J - ALASTAIR GRANT/AP/SIPA - YURI SMITYUK/TASS/SIPA USA/SIPA

Issus d'essais cliniques, les chiffres d'efficacité sont des moyennes données à titre indicatif et susceptibles d'évoluer en fonction des sous-groupes de populations étudiées et des critères observés.

variant. Comment l'expliquer ? Si les variants brésilien et sud-africain ont une capacité bien identifiée à échapper à certains anticorps, ces derniers ne sont pas la seule défense que produit le système immunitaire : il existe une réponse cellulaire fortement stimulée dont l'action est moins ciblée, mais déterminante pour combattre l'infection et qui permet d'éviter les formes graves.

La technique vaccinale influe-t-elle sur la réponse aux variants ?

Il y a différentes façons de présenter au système immunitaire la fameuse protéine Spike — l'antigène vaccinal — contre laquelle il doit apprendre à fabriquer ses défenses. L'ARN messager fait directement produire l'antigène par l'organisme *(lire p. 63)* et semble de loin la technique la plus efficace jusqu'ici. En effet, face aux variants B.1 351 et P.1, les niveaux d'anticorps neutralisants chez les personnes ayant reçu les vaccins de Pfizer ou Moderna ne diminuent que faiblement. Tous les autres types de vaccins testés enregistrent, eux, une baisse d'efficacité significative. Ainsi, le vaccin à protéine recombinante du laboratoire américain Novavax n'est efficace qu'à 60 % en Afrique du Sud contre 90 % au Royaume-Uni. Une baisse encore difficile à chiffrer est aussi mesurée pour les vaccins à vecteurs viraux d'AstraZeneca et Janssen, qui reposent sur des virus inoffensifs sur lesquels sont collés les antigènes de coronavirus. En utilisant deux adénovirus différents (Ad26 et Ad5) pour les deux doses, le russe Spoutnik V affiche 92 % d'efficacité sur le virus « classique », mais il n'a pas été testé sur les variants.
Enfin, l'utilisation d'un coronavirus entier atténué ou inactivé comme c'est le cas des vaccins chinois (Sinopharm et Sinovac dont l'efficacité globale atteint respectivement 80 % et 50 %) pourrait laisser penser à une moins grande sensibilité du vac-



cin aux variants, car il présente plus de protéines virales différentes autres que Spike. Mais il n'existe pas de données non plus.

À quand de nouveaux vaccins ?

Sur les trois laboratoires dont les vaccins sont autorisés en France, seuls AstraZeneca et Moderna travaillent à des rappels vaccinaux ciblant les nouveaux variants du coronavirus. Pfizer, lui, a jugé que les petites différences de neutralisation observées dans les études *in vitro* ne pouvaient pas conduire à une réduction significative de l'efficacité de son vaccin. Mais le cas échéant, le fabricant estime qu'il lui faudrait six semaines pour fournir un nouveau vaccin. La société Moderna avec les Instituts nationaux de la santé américains (NIH) a déjà lancé un essai clinique pour une troisième dose faite à partir du variant sud-africain. Quant au laboratoire AstraZeneca, il annonce son nouveau vaccin adapté aux mutations problématiques pour l'automne.

L'Agence européenne du médicament (EMA) a prévu une procédure de validation accélérée pour ces nouveaux vaccins : *« Nous demanderons des essais réduits, avec quelques centaines de participants, plutôt que 30 000 à 40 000 volontaires »*, a expliqué Marco Cavaleri, directeur de la stratégie sur les vaccins à l'EMA. De fait, plusieurs générations de vaccins anti-Covid seront sans doute nécessaires pour en finir avec la pandémie. D'ici là, moins le virus circulera, moins il y aura de risque de voir apparaître de nouveaux variants. ■

VACCIN Préparation visant à stimuler le système immunitaire contre l'attaque d'un pathogène identifié (virus ou bactérie) et à l'en immuniser.

ADN Molécule du noyau porteuse des gènes d'un organisme. L'être humain possède 20 000 gènes codants des protéines répartis sur 46 fragments d'ADN, les chromosomes.

ARN Molécule cousine de l'ADN. Elle en transfère les instructions dans le cytoplasme pour fabriquer les protéines correspondantes.

Pourquoi les stratégies à ARN se sont imposées

Plus rapides à développer que les vaccins « classiques », les nouvelles techniques offrent aussi une meilleure protection.

Alors qu'ils n'avaient jamais été utilisés en masse chez l'humain, les vaccins à ARN apparaissent comme la « révélation » de la course au vaccin contre le coronavirus Sras-CoV2. Sources de craintes légitimes car encore très peu étudiés, ils se sont révélés redoutablement efficaces, surpassant les vaccins « classiques » avec plus de 95 % de protection. Deux d'entre eux ont obtenu leur autorisation de mise sur le marché en France : celui de l'alliance américano-germanique Pzifer-BioNTech en décembre 2020 et celui de l'américain Moderna en janvier 2021.

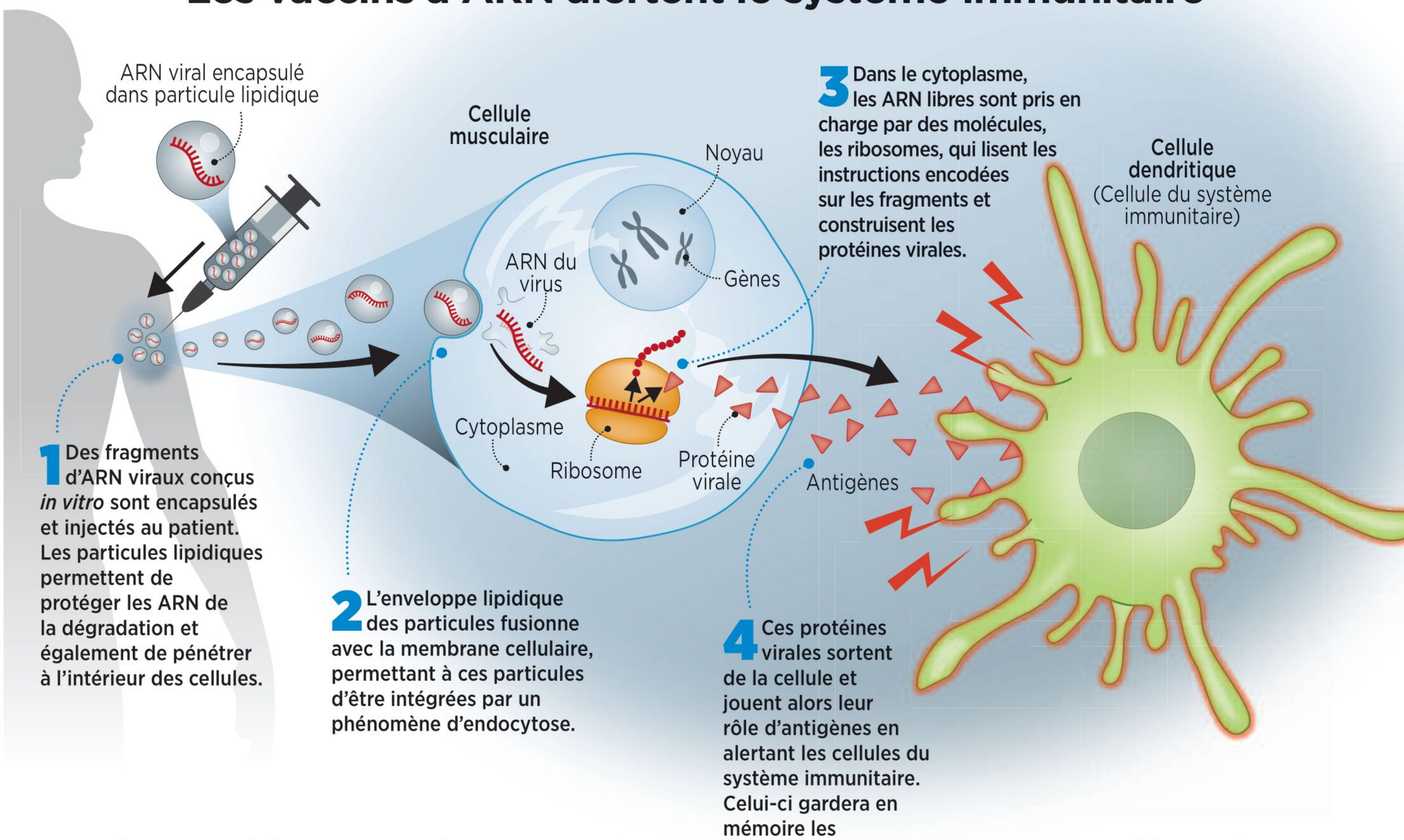
MARZENA SKUBATZ/LAIF-REA

Avec plus de 95 % de protection globale, les vaccins à ARN sont en tête de la course à l'efficacité (ici le laboratoire BioNTech).

Pourtant, vaccins classiques et vaccins à ARN semblent fondés sur le même principe et poursuivent le même but : fournir à l'organisme suffisamment d'informations sur le pathogène en circulation afin que le système immunitaire soit à même de le reconnaître et de réagir rapidement et efficacement lors d'une infection future. Seul diffère le type d'informations délivré. Mais cela change tout. Les vaccins traditionnels contiennent des éléments du virus, voire le virus en son entier, désactivé ou atténué. Ce sont alors des énormes complexes protéiques qu'il s'agit de synthétiser. Une étape fastidieuse car la mise au point de protéines reste un processus long, coûteux et très aléatoire. En tout cas en laboratoire. *« D'où l'idée de faire produire ces protéines direc-*

PHANIE

Les vaccins à ARN alertent le système immunitaire



BRUNO BOURGEOIS

tement par l'organisme de la personne à vacciner, explique Bruno Pitard, directeur de recherche CNRS au Centre de recherche en cancérologie et immunologie (Nantes-Angers). *Nos cellules ont la capacité de les fabriquer avec la forme exacte désirée et en un temps record, quelques secondes. Il suffit de leur fournir la séquence virale de l'antigène d'intérêt.* » Soit des bouts d'ARN messager (qui sont les supports intermédiaires des gènes) codant pour des protéines virales. Dans le cas du Covid-19, il s'agit des spicules présents à la surface du coronavirus. Inoculés, ces fragments d'ARN pénètrent dans les cellules où ils sont immédiatement pris en charge par notre machinerie cellulaire. Cette dernière « lit » les séquences, comme on lit des plans de montage, et fabrique alors les protéines correspondantes.

Une technologie testée depuis un quart de siècle

Une fois synthétisés, ces antigènes activeront notre système immunitaire qui se chargera de garder en mémoire le profil des intrus pour une éventuelle prochaine rencontre avec le véritable virus. Si la technologie des vaccins ARN apparaît aujourd'hui en pleine lumière, cela fait en réalité un quart de siècle qu'elle est testée et appliquée. Mais, jusqu'à présent, ces vaccins n'étaient utilisés qu'en médecine vétérinaire, par exemple pour protéger les saumons d'élevage d'une maladie infectieuse ou traiter les chiens d'un mélanome buccal. Il a fallu l'urgence sanitaire déclenchée par le coronavirus et les énormes moyens financiers investis pour qu'ils dépassent le stade des essais cliniques, chez l'humain, de phase 1 ou 2. Et, ce pour une raison majeure : ils nécessitent moins de temps d'élaboration car plus simples à fabriquer. Plus besoin de développer un virus dans un milieu cellulaire ou dans des œufs embryonnés de poule pour ensuite devoir le purifier. Ainsi, alors que plusieurs années sont nécessaires pour développer les

BRUNO PITARD

« L'idée est de faire produire les antigènes désirés directement par l'organisme de la personne à vacciner »

Bruno Pitard, directeur de recherche CNRS au Centre de recherche en cancérologie et immunologie (Nantes-Angers)

ingrédients protéiques d'un vaccin classique, quelques jours ont suffi pour synthétiser chimiquement les séquences d'ARN voulues et les introduire dans des vésicules lipidiques — des nanoparticules qui encapsulent l'ARN. Cette rapidité est également un atout face aux nouveaux variants du coronavirus contre lesquelles des versions vaccinales plus ciblées et efficaces sont attendues très prochainement *(lire p. 63)*.

Des solutions vaccinales dépourvues d'adjuvants

Par ailleurs, puisqu'ils ne contiennent que de l'ARN, ces nouveaux vaccins peuvent être considérés comme « plus purs ». Notamment, ils ne contiennent aucun adjuvant. L'inquiétude de voir l'ARN s'intégrer dans le génome et le modifier n'est *a priori* pas fondée car la molécule ne pénètre pas dans le noyau, où sont les gènes, mais demeure dans le cytoplasme. De plus, une fois traduite en protéine, elle est détruite par les agents cellulaires. Car l'acide ribo-nucléique a comme caractéristique d'être une molécule fragile.

Ce point rassurant pour la sûreté pose en revanche de gros problèmes d'ordre logistique. C'est en effet cette fragilité qui explique que les solutions vaccinales doivent être conservées à très basse température : - 20 °C pour le vaccin de Moderna et -70 °C pour celui de Pzifer-BioNTech. Impossible du coup de conserver le vaccin à la maison dans son réfrigérateur en attendant l'injection chez le médecin ; celui-ci doit disposer d'un moyen de réfrigération adéquat. En l'absence des infrastructures nécessaires à leur conservation, il est aussi à craindre que les vaccins à ARN n'atteignent jamais certains pays d'Afrique ou d'Asie et restent réservés aux seuls pays industrialisés. ■ **Hervé Ratel**

PHANIE

DERNIÈRES NOUVELLES

PETER BISCHOFF/GETTY IMAGES

Le marché de Wuhan n'est pas le site d'émergence du Sras-CoV-2 mais il a joué le rôle de super-propagateur, selon la mission d'enquête de l'OMS en Chine.

En Chine, l'enquête de l'OMS n'aboutit à rien de concluant

Après quatre semaines d'enquête à Wuhan, en Chine, épicentre de la pandémie, l'équipe internationale d'experts missionnée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) n'est pas parvenue à percer les origines précises du coronavirus. La piste d'une transmission de la chauve-souris à l'humain par un animal intermédiaire, non identifié, reste privilégiée. Tandis que la fuite d'un laboratoire est considérée comme *« hautement improbable »* par les experts, qui ont travaillé sous étroite surveillance des autorités chinoises. Une seule chose paraît certaine, le marché de Wuhan a servi de super-propagateur mais n'est pas le site d'émergence du virus.

L'Institut Pasteur stoppe son vaccin Covid

Coup dur pour l'Institut Pasteur de Paris, contraint de stopper le développement de l'un de ses vaccins Covid. Son partenaire industriel, le laboratoire américain Merck, a jugé insuffisante la capacité à induire une réponse immunitaire protectrice lors des essais de phase 2. La technique « vecteur rougeole » utilisée est pourtant un fleuron de l'Institut. Elle consiste à utiliser le vaccin contre la rougeole, l'un des plus sûrs et efficaces, pour acheminer l'antigène voulu. Deux autres vaccins continuent toutefois d'être développés par l'Institut Pasteur.

Le virus circulait en France en 2019

Sur 9000 échantillons sanguins analysés datant de novembre 2019 à janvier 2020, 13 montraient les traces d'une infection par le coronavirus Sras-CoV-2, suggérant une circulation dès le 16 novembre 2019. Un résultat troublant qui demande à être confirmé, mais qui coïncide avec d'autres études rapportant une présence en Italie dès l'automne 2019. Soit le virus circulait déjà à « bas bruit » en dehors de Chine à cette époque, soit les analyses sanguines rétrospectives manquent de spécificité et identifient les traces d'un autre virus.

Une pandémie qui tient dans une canette

L'ensemble des particules virales de Sras-CoV-2 émises dans le monde depuis le début de la pandémie tiendrait facilement dans une canette de soda. C'est le résultat d'un calcul de la biomasse totale du coronavirus, effectué par le biomathématicien Christian Yates, de l'université de Bath (Royaume-Uni).
À raison de trois millions de cas d'infection par jour, d'un pic de charge virale moyen estimé à dix milliards de virions d'une centaine de nanomètres chacun... Le volume total des quelque 200 millions de milliards de virions ainsi comptés n'excéderait pas 160 millilitres. **H. J.**

L'aube des cœurs artificiels

C'est un nouvel espoir pour les patients victimes d'une insuffisance cardiaque en phase terminale : une assistance circulatoire mécanique qui remplace l'organe défaillant. Le « cœur Carmat » français vient d'avoir le feu vert pour être commercialisé. D'autres dispositifs existent.

SEPT ANS APRÈS SA PREMIÈRE IMPLANTATION chez l'humain, le cœur artificiel du constructeur français Carmat a obtenu fin 2020 le marquage CE (conformité européenne). Une étape réglementaire qui lui ouvre les portes de la commercialisation au cours de cette année. Il devra trouver sa place dans l'univers des assistances circulatoires mécaniques (ACM). Ils sont conçus pour prendre le relais du cœur, qui n'est rien d'autre qu'une pompe qui bat en permanence, 60 à 90 fois par minute au repos, soit 40 millions de fois par an.

Près de 250 patients sont concernés en France par an

Parfois, en cas d'insuffisance cardiaque sévère avancée, la pompe lâche : les deux ventricules ne parviennent plus à se contracter efficacement, et ne remplissent plus leurs rôles : pour le gauche, éjecter le sang oxygéné vers l'aorte ; pour le droit, propulser le sang appauvri en oxygène vers les poumons. Une affection fréquente et insuffisamment prise en charge en France *(lire l'encadré ci-contre)*. Au stade terminal, il n'y a alors d'autre choix que de remplacer les ventricules défectueux par une assistance circulatoire mécanique, parfois posée dans en très grande urgence *(lire l'encadré p. 68)*. Chaque année en France environ 250 patients sont concernés par la pose d'un « vrai-faux » cœur. Qu'il s'agisse d'un cœur artificiel total, implanté à la place de l'organe malade, ou d'un dispositif d'assistance ventriculaire gauche (LVAD), auquel le cœur est relié, il s'agit toujours de machines ultra-perfectionnées et très coûteuses (plus de 100 000 euros, hors pose) insérées dans le thorax.

Le premier cœur artificiel total a été testé en 1969, mais ce n'est qu'en 1982 que cette prothèse intracorporelle prendra son essor, après son implantation chez un Américain, Barney Clark. Le cœur artificiel est alors relié à une très volumineuse console extérieure dont le patient ne peut s'éloigner. À la suite de nombreuses complications, celui-ci décéda au bout de 112 jours. Depuis ces expériences pionnières, tout a bien changé. « *Les progrès de ces quinze dernières années ont été considérables* », confirme le professeur Erwan Flécher, chirurgien thoracique et cardio-vasculaire au centre hospitalier universitaire de Rennes. Aujourd'hui, les machines sont plus petites (500 à 900 g), plus silencieuses, et dotées, selon les modèles, de miniturbines, de motopompes, de valves cardiaques reconstituées (carbone, péricarde bovin).

Les machines s'adaptent aux activités du malade

Parfois, on y trouve aussi de la microélectronique, permettant une adaptation automatique aux activités du patient grâce à la présence de microcapteurs sensibles, par exemple, à l'accélération de la marche. C'est le cas du cœur Carmat, imaginé par le chirurgien Alain Carpentier et rebaptisé Aeson, en référence au héros de la mythologie grecque rajeuni par Médée. Il n'a toutefois été posé à ce jour que chez moins de 20 patients dans le monde, avec un maximum de survie de vingt mois. Ses essais doivent se poursuivre en Europe, et aussi outre-Atlantique, où il devra faire face à son concurrent américain Syncardia, déjà implanté chez plus 1500 patients en vingt-cinq ans. Problème, aucune de ces prothèses n'est autonome. Les patients sont toujours reliés par des câbles sortant de l'abdomen ou de derrière l'oreille, à des batteries portées en bandoulière (1 à 2 kg) d'autonomie variable (6 à 10 heures). « *Des techniques de transfert d'énergie transcutané, un dispositif sans fil pour recharger la batterie implantable, sont à l'étude* », explique le Pr Flécher.

PRISE EN CHARGE

Mieux diagnostiquer et soigner l'insuffisance cardiaque

Essoufflement, toux… *« Une personne atteinte d'insuffisance cardiaque sur deux n'a jamais vu un cardiologue »*, regrette le Pr Daniel Loisance, chirurgien cardiaque et membre de l'Académie de médecine. Consulté par ses pairs chargés d'un récent rapport remis fin 2020 à l'Académie de médecine, il milite pour une meilleure prise en charge de cette pathologie grave responsable de 70 000 morts par an en France. Le rapport pointe en effet une grande hétérogénéité de l'accès aux transplantations et aux assistances circulatoires. Résultat, *« de nombreux patients ne sont pas adressés aux centres de compétence et finissent par décéder »*, précise le rapport, sans toutefois fournir de chiffres. *« D'autres patients sont "référés" trop tard, ce qui rend les choix thérapeutiques limités, voire inexistants. »*

Deux dispositifs peuvent être implantés dans le thorax

CARMAT

Aeson (Carmat) pèse 900 g pour un volume de 750 ml. Composé de 4 valves et de 2 cavités ventriculaires, il embarque des capteurs et des composants électroniques qui pilotent le système et s'adaptent aux besoins du patient.

SYNCARDIA

Syncardia TAH pèse 160 g pour un volume de 400 ml. Il remplace complètement les ventricules et les 4 valves cardiaques.

Trois dispositifs d'assistance ventriculaire reliés au cœur

ABBOTT

HeartMate 3 est implanté dans le ventricule gauche défaillant pour l'aider à pomper le sang et alimenter correctement les organes vitaux.

JARVICK HEART, INC.

Jarvik 2000 permet d'intensifier le flux sanguin grâce à sa miniturbine à travers laquelle passe le sang.

MEDTRONIC

Heartware est doté d'un « impulseur » en rotation dans un champ magnétique qui produit un flux sanguin continu.

Mais la transplantation cardiaque « classique » n'est pas accessible à tous. Pénurie de greffons oblige, si en France, près de 1000 personnes sont inscrites sur listes d'attente d'un cœur, seules 500 sont greffées chaque année, après moins d'un an d'attente en moyenne. Ces patients très essoufflés et fragiles, pour qui se lever et aller du lit au fauteuil est un défi quotidien, relèvent de deux cas de figure. Soit leur état est compatible avec une transplantation à venir et l'assistance circulatoire mécanique est alors temporaire, soit ils ne remplissent pas les critères des candidats aux greffes (parce que trop âgés par exemple) et l'assistance sera permanente. *« L'objectif est en fait de parvenir à poser la bonne prothèse au bon moment chez le bon patient. Tout se discute au cas par cas »*, résume le Pr Flécher.

Pour cela, les spécialistes (chirurgiens, anesthésistes-réanimateurs, cardiologues, infirmières) doivent croiser de très nombreux facteurs : l'âge, les antécédents médicaux, l'autonomie du patient, sa corpulence (Aeson de Carmat ne peut pas être posé chez les personnes de petit gabarit), l'état précis de la fonction cardiaque, sans oublier l'expérience et le savoir-faire des équipes. Certains malades vivent ainsi « assistés » pendant plusieurs années, parfois près de dix ans, le dispositif pouvant toujours être remplacé en cas de panne ou d'usure. Avantage : avec ces pompes artifi-

URGENCE

Une assistance circulatoire soutient le cœur qui flanche

Quand le cœur lâche brutalement, par exemple en pleine nuit chez un patient déjà hospitalisé pour une insuffisance cardiaque sévère ou juste après une chirurgie cardiaque, l'urgence vitale est en jeu. Des solutions dites d'assistance circulatoire mécanique temporaire, c'est-à-dire ne pouvant rester en place que quelques jours ou semaines au maximum, peuvent alors parfois être tentées. « *Trois principales solutions existent, détaille* le Pr Erwan Flécher, chirurgien au CHU de Rennes. *Aucune ne soigne mais toutes* cielles, pas de traitement antirejet comme avec la transplantation. Mais des contraintes, telle que la prise d'anticoagulants à vie, avec son lot de complications (saignements, accidents vasculaires cérébraux). « *Sans oublier les infections au niveau de la sortie du câble, d'où la nécessité des pansements réguliers et méticuleux* », signale Véronique Desriac. Première infirmière en France à occuper un poste de coordinatrice dispositifs d'assistance ventriculaire, créé pour elle en 2010, elle accompagne, au centre hospitalier universitaire de Rennes, les patients avant et après la pose.

AFP

L'ECMO permet l'oxygénation du poumon à travers une membrane extracorporelle. C'est une technique de sauvetage lourde qui reste exceptionnelle (ici un patient atteint du Covid-19, à Wuhan, en Chine, en février 2020).

Exemple avec Marc, aujourd'hui âgé de 59 ans, qui en avait 44 en 2005 quand il a été victime d'un premier infarctus. Au fil du temps, son cœur s'est détérioré jusqu'à la pose d'une assistance circulatoire mécanique à Lille en 2011. « *C'était juste ça ou rien*, se souvient-il. *Je l'ai gardée deux ans avant une greffe en 2013. Je me posais plein de questions et me sentais bien seul.* » Il a d'ailleurs depuis créé un site* et une page Facebook où désormais près de 700 personnes, malades et proches, peuvent échanger et se soutenir. Car vivre sous la dépendance d'une technologie affectant autant l'intégrité corporelle nécessite un suivi tant médical que psychologique. « *En une vingtaine heures de programmes d'éducation thérapeutique, les patients sont autonomes dans la surveillance et la manipulation de leur dispositif* », précise Véronique Desriac. Bonne nouvelle, pour améliorer la prise en charge des détresses cardiaques et résorber les inégalités récemment soulignées par l'Académie de médecine *(lire l'encadré p. 66)*, un réseau d'unités mobiles d'assistance circulatoire (Umac), capables d'intervenir 24 heures sur 24, est en train de se mettre en place sur tout le territoire. ■

Sylvie Riou-Milliot

*www.coeurassistance.com

V. DERSIAC

« En une vingtaine d'heures d'éducation thérapeutique, les patients sont autonomes par rapport au dispositif »

Véronique Desriac, infirmière, coordinatrice dispositifs d'assistance ventriculaire au centre hospitalier universitaire de Rennes

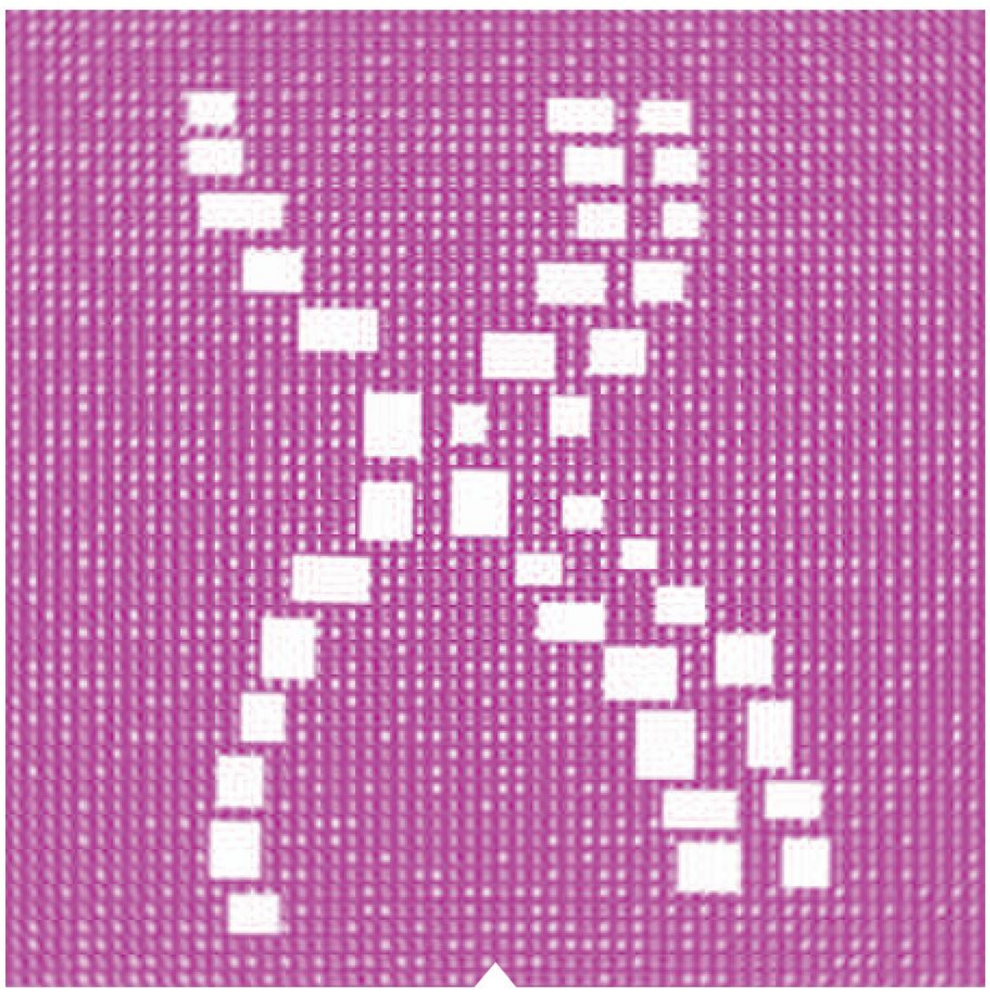
Une IA a créé des bribes de génomes humains

Des chercheurs ont généré sur ordinateur des séquences d'ADN humain entièrement artificielles comptant plusieurs millions de bases.

POUR LA PREMIÈRE FOIS, des chercheurs ont produit sur ordinateur de longues séquences d'ADN humain entièrement artificielles. Ils ont entraîné des réseaux de neurones, appelés GAN (réseaux neuronaux génératifs) sur l'ADN de 2500 personnes. Le système devait créer des séquences aux caractéristiques similaires, mélanger ses créations avec de vrais génomes puis vérifier qu'on ne pouvait pas faire la différence. À force d'entraînement, les génomes artificiels ont fini par reproduire fidèlement les caractéristiques des vrais, telles que les fréquences des allèles (les différentes versions d'un gène).

Ce type de réseau de neurones avait déjà été utilisé pour la génération de courtes séquences, *« de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de paires de bases* [les briques constituant notre ADN, qui sont chez nous au nombre d'environ 3 milliards], explique Flora Jay, qui a codirigé ces travaux européens à l'université Paris-Saclay (Essonne). *Mais obtenir des séquences aussi longues, d'une dizaine de milliers de variants couvrant plusieurs millions de paires de bases, et pour une grande diversité d'individus, est inédit, et constitue une grande avancée.* »

Pourtant, en comparaison du génome humain, qui comprend 3 milliards de bases, il ne s'agit encore que de bribes, correspondant à une petite partie d'un chromosome. *« En raison des limites de calcul, ces modèles ne peuvent pas encore être exploités pour créer des génomes artificiels entiers »*, explique Aurélien Decelle, également coauteur de ces travaux. En attendant, l'équipe a relevé deux défis majeurs. D'abord, contrôler par des calculs statistiques que les séquences artificielles sont bien similaires aux vraies. Ensuite, s'assurer de *« leur originalité, c'est-à-dire qu'elles soient suffisamment différentes des génomes de véritables donneurs »*, précise Flora Jay. Car tout l'enjeu de ces recherches réside dans la création de génomes qui n'appartiennent à personne. Ces séquences n'ont pas vocation à être synthétisées dans le monde physique, mais à alimenter une banque de données destinée aux chercheurs.



BURAK YALMEN

Chromosome numérique obtenu grâce à des algorithmes d'apprentissage automatique (« machine learning »), une technique de base de l'intelligence artificielle (IA).

Tout l'enjeu réside dans la création de génomes qui n'appartiennent à personne

Une aide précieuse pour l'épidémiologie

Celle-ci sera précieuse, par exemple, dans le domaine de la génétique des populations, qui étudie la distribution et l'évolution des gènes au sein d'une population. *« Les chercheurs doivent régulièrement comparer les données qu'ils ont produites avec des génomes de référence, qui idéalement reflètent la diversité génétique »*, explique Flora Jay. Il existe pour cela d'énormes biobanques qui répertorient des génomes réels, mais leur accès impose de composer avec des barrières éthiques liées à la protection des données privées. Les mêmes obstacles se dressent pour des études sur notre passé évolutif ou l'épidémiologie. *« Les génomes artificiels peuvent nous aider à surmonter ce problème dans un cadre éthique sûr »*, conclut le premier auteur Burak Yelmen, de l'université Paris-Saclay. ■ **Camille Gaubert**

@CamilleGaubertb

Cinq questions pour (ré)apprendre à dormir

Pour ceux qui ont du mal à s'endormir ou à faire une nuit complète et reposante, il est indispensable de connaître les mécanismes du sommeil afin d'adopter les bons comportements.

1 À quoi ressemble la chambre à coucher idéale ?

Certaines personnes sont très sensibles aux conditions dans lesquelles elles dorment. Opter pour l'environnement optimal, c'est avant tout choisir une literie de qualité et de dimension suffisante : des études ont montré que lorsque l'on dort à deux, on gagne 15 % de temps de sommeil profond — le plus réparateur — avec un matelas de 160 cm de large par rapport à un de 140 cm ! Privilégier ensuite draps, couettes ou couvertures en fibres naturelles, qui sont plus « respirantes » et régulent mieux la température que du synthétique. La chambre doit permettre de s'isoler le plus possible du bruit et, pour ceux qui ne la supportent pas, de la lumière (double vitrage, rideaux occultants ou volets). Ces deux facteurs sont en effet les principaux éléments perturbateurs de la qualité du sommeil. Par ailleurs, l'idéal est une chambre dont la température ambiante oscille entre 16 et 19 °C selon les spécialistes. Enfin, mieux vaut réserver son lit au seul sommeil et, bien sûr, aux activités sexuelles. La tentation est grande pour certains d'y regarder les écrans, manger ou même travailler, autant de comportements qui peuvent favoriser l'insomnie *(lire plus loin)*.

BSIP

SOMMEIL NOCTURNE

7 à 9 heures

Besoin de sommeil entre 18 et 64 ans.

6 h 42 min

Temps de sommeil moyen des adultes en 2017 en France.

Moins de 6 heures

en semaine pour près de 36 % de la population adulte.

SOURCES : NATIONAL SLEEP FONDATION, SANTÉ PUBLIQUE FRANCE

2 Quelles activités sont-elles déconseillées le soir ?

Attention aux mauvaises habitudes avant d'aller se coucher. Si l'on ressent des difficultés à s'endormir, il convient d'écarter certains comportements deux à trois heures avant d'aller au lit : ne pas consommer d'alcool ou d'excitants comme le café ou le thé ; ne pas faire de sport ou d'activité physique intense, ni prendre de douche ou de bain trop chauds car cela augmente la température corporelle et le rythme cardiaque, ce qui rend l'endormissement plus difficile ; ne pas manger de repas trop riches, difficiles à digérer, et privilégier les féculents dont les sucres lents évitent les fringales nocturnes ; bannir ordinateur, tablette et téléphone portable dont les écrans émettent une lumière bleue qui stimule l'horloge interne et retarde d'autant l'endormissement. Enfin, mieux vaut ne pas ressasser la journée passée ou planifier celle à venir ! Pour « lâcher prise » et permettre au cerveau de ralentir son activité, des pratiques relaxantes comme la lecture ou l'écoute de podcasts sont conseillées, voire des activités manuelles et, bien sûr, la méditation.

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

On peut toujours compter sur la nature

Ou sur L72, un médicament homéopathique aux 10 substances actives traditionnellement utilisé dans les troubles mineurs du sommeil liés à la nervosité (émotivité, stress).

Difficultés d'endormissement, sommeil agité, réveils nocturnes ou précoces...

Chez l'enfant, un trouble du sommeil nécessite de consulter un médecin.

Sans accoutumance.

Disponible sans ordonnance en pharmacie.

FABRIQUÉ EN FRANCE

À partir de 30 mois

VU à la TV

NOUVEAU

À partir de 30 mois

Contient de l'alcool

OU

Contient du lactose

Lire attentivement la notice. Si les symptômes persistent, consultez votre médecin. Demandez conseil à votre pharmacien.

Laboratoires Lehning 3, rue du petit marais 57640 Sainte-Barbe. VISA N°19/11/60202031/GP/002 - 2021-PI-006.

LEHNING LABORATOIRES

AVIS D'EXPERT

DR SYLVIE ROYANT-PAROLA

PSYCHIATRE, PRÉSIDENTE DU RÉSEAU MORPHÉE, CONSACRÉ À LA PRISE EN CHARGE DES TROUBLES CHRONIQUES DU SOMMEIL

« Ne pas culpabiliser ceux qui prennent des somnifères »

Quand faut-il envisager d'avoir recours aux somnifères ?
Les somnifères sont utiles face à une situation d'urgence : une insomnie très invalidante qui ne se résout pas par les mesures d'hygiène de vie *(lire ci-contre)* et lorsque l'on est dans l'impossibilité d'être pris en charge rapidement par un médecin spécialiste du sommeil.
Ils permettent de passer un cap, de récupérer. En revanche, sauf cas particulier, ils ne doivent pas être considérés comme un traitement de fond de l'insomnie chronique.

S. ROYANT-PAROLA

Quels sont les risques de tels médicaments ?
Tout dépend des doses et de la durée du traitement. À court terme, il y a un risque de somnolence le lendemain de la prise.
Il ne faut pas oublier que ce sont des hypnotiques. À long terme, il y a des effets sur la mémoire notamment. Et surtout des problèmes d'accoutumance — le besoin d'augmenter les doses pour avoir le même effet — et de dépendance. C'est pourquoi il ne faut jamais arrêter brutalement un traitement, surtout si on le prend depuis plusieurs semaines.

Est-on trop réticent vis-à-vis des somnifères ?
Rien ne sert de culpabiliser ceux qui en consomment pendant quelques jours à quelques semaines. Il faut les prendre pour ce qu'ils sont : un remède potentiel face à une situation de crise, avant la mise en place d'une stratégie de prise en charge globale. Les somnifères traitent ponctuellement le problème, mais pas ses causes. Face à une insomnie chronique, il est indispensable de consulter un spécialiste. Et c'est également nécessaire lorsque l'on veut arrêter un tel traitement. ■

Propos recueillis par E. G.

3 Faut-il attendre d'avoir sommeil pour se mettre au lit ?

Que l'on soit ou non un bon dormeur, il est très difficile de se forcer. Chacun doit donc respecter ses propres rythmes et besoins. Tout au long de la journée, notre organisme fonctionne en effet selon les rythmes dictés par notre horloge biologique. Il est important d'écouter son corps et de prendre conscience des signaux qu'il envoie. Bâillements, yeux qui se ferment en sont les symptômes les plus connus, mais il existe aussi la sensation de refroidissement et bien sûr l'engourdissement… Si vous résistez, il est fort probable que vous soyez obligé d'attendre 60 à 90 minutes — soit environ un cycle de sommeil — avant de ressentir à nouveau ces signes. Pour ceux qui ont du mal à les percevoir, la solution est de se mettre au lit en optant pour une activité calme (lecture, tricot…), ce qui permet d'être plus attentif à leur apparition.

4 La sieste empêche-t-elle de bien dormir la nuit ?

Depuis des années, de nombreuses études scientifiques* constatent les bienfaits de la sieste sur la santé et le fonctionnement du cerveau : augmentation de la vigilance et de la concentration, amélioration des performances cognitives, meilleure mémorisation, créativité et productivité accrues… Ce qui est valable pour les enfants l'est tout autant pour les adultes. Chez ces derniers, une sieste apporterait même autant de bienfaits qu'un cycle complet de sommeil nocturne de 60 à 90 minutes. Elle diminuerait par ailleurs la sensibilité au stress. Ainsi, 15 à 20 minutes de sommeil après le déjeuner constituent un excellent moyen de récupérer en cas de mauvaise nuit, et même tout simplement de repartir d'attaque pour la seconde partie de la journée. D'ailleurs, notre corps nous le fait sentir, la baisse de vigilance est manifeste à ce moment-là. Pourtant, seulement un Français sur trois ferait la sieste au moins une fois par semaine, d'après une étude sur le temps de sommeil en France, publiée en 2019 dans le *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*.

5 Quelle est la meilleure façon de se réveiller ?

Bien se réveiller peut influencer le déroulement de la journée et donc la qualité du sommeil la nuit suivante. L'idéal est de le faire à peu près à la même heure tous les jours, week-end compris, avec l'aide de la lumière naturelle pour ceux qui le souhaitent ou une lampe reproduisant la lumière du jour pour ceux qui préfèrent dormir dans l'obscurité totale. Et, surtout, ne pas trop traîner au lit : ainsi gare à la fonction « répétition » des réveils ! À défaut, il est important de s'exposer à la lumière du jour au moins 30 minutes dans la matinée, afin de resynchroniser son horloge interne.
Quelques étirements rapides et simples à effectuer peuvent être utiles pour réveiller tout en douceur les muscles et les articulations après plusieurs heures d'immobilité. Les plus organisés auront préparé leur tenue et la table du petit déjeuner la veille, afin de démarrer la journée sans trop de pression. Quant au petit déjeuner, il est préférable d'éviter les préparations industrielles ultratransformées, trop grasses et trop sucrées. ■

* Lire notamment la revue de la littérature scientifique réalisée en 2010 par Nicole Lovato et ses collègues de l'Adelaide Institute for Sleep Health (Australie) parue dans *Progress in Brain Research.*

Solgardez votre sommeil !

Le flacon d'or Solgar contient de la mélatonine
qui contribue à réduire le temps d'endormissement
et les effets du décalage horaire.

En pharmacies et magasins de diététique.

SOLGAR
Since 1947

Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour. www.mangerbouger.fr

Solgar.fr

Faut-il encore suivre la règle des trois repas ?

Petit déjeuner, déjeuner, dîner…
Ce rythme quotidien ne repose pas
sur des besoins métaboliques.
Mais les habitudes alimentaires ont la vie dure.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

Trois quarts des Français restent attachés au modèle des trois repas quotidiens, fondé sur la convivialité (1). Mais cette organisation diffère selon les pays. Les Espagnols s'autorisent ainsi deux collations supplémentaires en milieu de matinée et d'après-midi tandis que les Suédois, après un petit-déjeuner et un sandwich le midi, partagent le repas de la journée vers 16-18 heures, auquel peut être ajouté un en-cas vers 21 heures. En France, ce n'est vraiment qu'au XIXe siècle avec la révolution industrielle qu'apparaît la règle des trois repas. Le petit déjeuner permet de prendre des forces avant d'aller travailler tandis que le dîner devient populaire avec l'utilisation généralisée de la lumière artificielle, facilitant la prise des repas après la tombée de la nuit.

« *Prendre trois repas par jour est devenu une norme sociétale mais ce principe ne repose pas réellement sur des besoins métaboliques. Pour certaines personnes, deux repas équilibrés peuvent suffire* », remarque Damien Galtier, diététicien-nutritionniste au centre hospitalier Frédéric-Henri-Manhès, à Fleury-Mérogis (Essonne). S'y astreindre n'est donc pas nécessaire pour être en bonne santé, sachant qu'il est recommandé de répartir les apports caloriques dans la journée (1800 à 2000 kcal pour une femme et 2100 à 2700 kcal pour un homme). Mieux vaut respecter sa faim et sa satiété et éviter certaines erreurs de *timing*.

Le nombre de repas influencerait le poids

Les études sont contradictoires. Des chercheurs américains ont constaté que les personnes qui ne prennent qu'un ou deux repas par jour ont un indice de masse corporelle (IMC) diminué de 0,02 point en un an contre 0,02 à 0,04 point gagné chez celles qui se restaurent plus de trois fois. Selon cette même étude, un jeûne de 18 heures entre le dîner et le petit déjeuner entraînerait une perte de 0,03 point

38 %

des Français mangent au moins une fois en dehors des repas tous les jours. 35 % assurent craquer pour un en-cas, deux à trois fois par semaine.

(SOURCE : CREDOC 2018.)

INDICE DE MASSE CORPORELLE (IMC) Correspond au poids en kilos divisé par le carré de la taille exprimée en mètres (kg/m^2). Il permet d'estimer le surpoids (indice compris entre 25 et 30) et l'obésité (supérieur à 30) chez les adultes.

HORLOGES BIOLOGIQUES PÉRIPHÉRIQUES Présentes dans tous les organes et tissus aux fonctions essentielles, cœur, poumon, foie, muscles, reins, rétine, elles suivent leur propre rythme endogène. Elles sont synchronisées entre elles et avec l'horloge circadienne centrale.

DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE Quantité d'énergie (en kcal ou en kJ) pour un poids donné d'aliment (par exemple kcal/100 g).

maximum d'IMC par an, contre une augmentation de 0,02 point pour un jeûne de 7 à 11 heures (2). Toutefois, des travaux espagnols menés sur 260 adultes suggèrent… l'inverse ! Les personnes qui prennent plus de cinq repas ou collations par jour ont un IMC moyen plus faible (21,6), par rapport à celles mangeant moins de trois fois (23,5) sans que l'étude renseigne sur les quantités ingérées (3). Ce qui est certain, c'est que le grignotage impulsif finit par peser sur la balance. Selon l'étude française NutriNet-Santé réalisée auprès de 500 000 internautes, les grignoteurs réguliers absorbent en moyenne 484 kcal supplémentaires par jour (soit environ 25 % des apports journaliers recommandés pour une femme) et 273 kcal pour les occasionnels, surtout en chips et sucreries.

Sauter le petit déjeuner perturberait la glycémie

Le petit déjeuner n'aurait pas d'incidence sur le poids, selon des travaux américains. Répartis au hasard en trois groupes, 300 participants en surpoids ont dû le prendre, le supprimer ou poursuivre leurs habitudes alimentaires. Après seize semaines, personne n'avait enregistré de gain ou de perte de poids significatifs (moins de 1 kg perdu par personne). De plus, sauter le petit déjeuner n'avait pas incité à manger plus aux autres repas (4). En revanche, faire l'impasse sur ce premier repas aurait un effet néfaste sur les horloges biologiques périphériques : la régulation du métabolisme du glucose, qui contrôle la glycémie et les taux d'insuline dans le sang, serait perturbée, selon des chercheurs israéliens (5).

Manger à heures fixes n'est pas nécessaire…

L'heure des horloges n'a pas nécessairement de lien avec nos besoins alimentaires. Pour nombre de nutritionnistes, il faut suivre naturellement sa faim, sans se forcer. Des recommandations approuvées par une étude française montrant une association entre l'alimentation dite intuitive et un meilleur contrôle du poids. Les participants qui « écoutent » leur corps et mangent seulement quand ils ressentent la faim en s'arrêtant quand les signaux de satiété apparaissent ont une corpulence normale, avec un moindre risque de surpoids par rapport à ceux qui n'y prêtent pas attention. Pour les auteurs, le fait que ne pas se restreindre quand on a faim n'entraîne pas de prise de poids semble confirmer que les régimes ne fonctionnent pas sur le long terme, comme l'ont montré de nombreuses autres études (6).

… mais se restaurer tardivement jouerait sur le métabolisme

C'est ce qui ressort de travaux hispano-américains réalisés auprès de 3362 adultes. Déjeuner après 15 heures augmenterait le risque de 22 % de devenir obèse, en raison d'une augmentation du taux des triglycérides et d'une moindre sensibilité à l'insuline par rapport aux individus prenant leur repas avant 15 heures (7). De même, dîner peu de temps avant le coucher induirait une intolérance nocturne au glucose et pourrait favoriser l'obésité si cela devient chronique, d'après une étude menée sur un petit échantillon de 20 personnes (10 hommes et 10 femmes). Les individus ayant dîné à 22 heures pour un coucher à 23 heures ont vu grimper de 18 % leur taux de glucose dans le sang (glycémie) et réduire de 10 % la quantité de graisses brûlées, par rapport à ceux qui prenaient le même dîner, à 18 heures (8). ■

Sylvie Boistard @syboistard

DAMIEN GALTIER Diététicien-nutritionniste, au centre hospitalier de Fleury-Mérogis (Essonne)

Fractionner les repas en cas de perte d'appétit

« Cinq à six prises alimentaires par jour sont conseillées aux femmes enceintes, aux personnes âgées et à celles qui suivent un traitement anticancéreux et manquent d'appétit. Il ne s'agit pas de grignoter tout au long de la journée mais de réduire les quantités prises aux repas principaux et d'ajuster avec des collations structurées. La densité énergétique quotidienne et la répartition entre protéines, lipides et glucides reste conservée. C'est aussi bénéfique aux individus qui n'ont pas d'appétit au saut du lit. Ils peuvent décaler ce premier repas par une collation dans la matinée, et ceux qui ne prennent qu'un sandwich au déjeuner, très vite digéré, peuvent manger un fruit ou quelques fruits secs (amandes, noix, etc.) vers 16 ou 17 heures. »

(1) Is There Still a French Eating Model ? Riou J. et al, *Plos One*, 2015.

(2) Meal Frequency and Timing Are Associated with Changes in Body Mass Index in Adventist Health Study 2, Kahleova H. et al, *J. Nutr*, 2017.

(3) Higher eating frequency is associated with lower adiposity and robust circadian rhythms, Zerón-Rugerio MF. et al, *Am J Clin Nutr*, 2020.

(4) The effectiveness of breakfast recommandations on weight loss, Dhurandhar E. et al, Am *J Clin Nutr*, 2014.

(5) Influences of Breakfast on Clock Gene Expression and Postprandial Glycemia in Healthy Individuals and Individuals With Diabetes, Jakubowicz D. et al, *Diabetes Care*, 2017.

(6) Intuitive Eating is Inversely Associated with Body Weight Status in the General Population-Based NutriNet-Santé Study, Camilleri GM. et al, *Obesity*, 2016.

(7) Late eating is associated with cardiometabolic risk traits, obesogenic behaviors, and impaired weight loss, Dashti H *S. et al,* Am J Clin Nutr., 2020.

(8) Metabolic Effects of Late Dinner in Healthy Volunteers, Gu C. et al, *J. Clin. Endocrinol. Metab*, 2020.

BURGER/PHANIE

Plus de 3,8 millions de personnes vivant en France ont ou ont eu un cancer.

Dix ans pour faire reculer le cancer

Les objectifs principaux du 4e plan cancer sont de faire baisser de 60 000 le nombre de nouveaux cas par an d'ici à 2040 et d'améliorer le dépistage.

La France affiche sa volonté de faire reculer le cancer : c'est l'ambition forte, étayée pour la première fois par des objectifs chiffrés, du 4e « plan cancer » détaillé par le président de la République Emmanuel Macron le 4 février. Pour y parvenir, ce programme s'étalera sur dix ans, contre cinq pour les trois premiers plans. Aujourd'hui plus de 3,8 millions de personnes vivant en France ont ou ont eu un cancer. Les objectifs sont : 1) de faire baisser d'ici à 2040 de 60 000 cas par an le nombre de nouveaux cancers évitables (estimé aujourd'hui à environ 153 000) ; 2) augmenter d'un million par an, à partir de 2025, le nombre de personnes dépistées (aujourd'hui 9 millions de dépistages sont réalisés chaque année) ; 3) réduire de 30 % la part des patients souffrant de séquelles cinq ans après leur diagnostic. Un quatrième objectif, non chiffré, est d'améliorer d'ici à 2030 les taux de survie des cancers dits de mauvais pronostic. Pour l'ensemble de ces actions, le budget a été augmenté de 20 %, avec une dotation globale de 1,74 milliard d'euros. Voici comment doivent se décliner les quatre axes du plan.

1. Améliorer la prévention

Les objectifs sont connus : en finir avec le tabac, réduire la consommation d'alcool, favoriser l'accès à une alimentation équilibrée, encourager l'exercice physique, diminuer la sédentarité. Sans oublier de prévenir le risque infectieux des papillomavirus contre lequel un vaccin existe, et la lutte contre les quatre principaux facteurs de risque de cancers professionnels (amiante, chrome, silice cristalline, peintures). Dernier point : améliorer l'accès au dépistage.

2. Limiter les séquelles et améliorer la qualité de vie

Il s'agit ici de trouver le point d'équilibre entre l'administration rapide de traitements efficaces innovants au plus grand nombre et la réduction de leurs effets secondaires, souvent handicapants. L'idée est de favoriser quand c'est possible la désescalade thérapeutique tout en améliorant la personnalisation des traitements, en renforçant l'accès aux soins de support et en rompant l'isolement des malades.

3. Lutter contre les cancers de mauvais pronostic

La recherche doit être restructurée pour les cancers dits de mauvais pronostic qui présentent un taux de survie à cinq ans inférieur à 33 % (pancréas, œsophage, foie, poumon, système nerveux central, ovaire, bouche). Ainsi, des réseaux de recherche spécialisés sur ces tumeurs seront labellisés. Des actions seront en outre conduites pour attirer des jeunes chercheurs avec la création de programmes dits High Risk, High Gain (« risques élevés, gains élevés »).

4. S'assurer que les progrès bénéficient à tous

Cet axe transversal majeur prévoit de réduire les inégalités sociales et territoriales d'accès aux soins. Il s'agira également de lutter contre le renoncement aux soins et, pour cela, de mieux en connaître les ressorts. D'où la nécessité de programmes de recherche en sciences humaines et sociales et d'inclure des populations vulnérables dans les essais cliniques. ■

Sylvie Riou-Milliot

Entretien avec...

Accélérer la recherche sur les maladies génétiques

© Julien Lamy

Le Pr Stanislas Lyonnet dirige l'Institut *Imagine*, leader européen des soins et de la recherche sur les maladies génétiques avec 24 laboratoires de recherche fondamentale, 4 laboratoires associés de recherche clinique, 25 centres de référence maladies rares et 545 chercheurs et médecins.

Quels sont vos domaines de recherche prioritaires ?

Nous avons labellisé six programmes intégrés de recherche et de soins (iCARP) sur l'immunologie et les maladies infectieuses, l'hématologie, les neurosciences, les malformations congénitales, les maladies rénales et la science des données. Ces outils très souples, stabilisés sous cette forme depuis deux ans, sont appelés à évoluer en cas de besoin.

Quid des études cliniques ?

Parmi les 544 études cliniques en cours certaines utilisent la thérapie génique pour remplacer ou modifier un gène, en hématologie ou immunologie. Des cellules souches de la moelle osseuse sont prélevées et modifiées afin d'être retransfusées pour compenser un déficit génétique. D'autres études portent sur le développement de nouvelles molécules, le repositionnement de molécules ayant fait leurs preuves dans d'autres pathologies, la compréhension des mécanismes et des symptômes, la corrélation entre anomalies génétiques et signes cliniques.

Vos objectifs pour 2028 ?

Nous voulons faire passer de 40 à 80 % le taux d'élucidation diagnostique pour mettre un terme à l'errance diagnostique des enfants et doubler le nombre d'enfants inclus dans des essais cliniques (ils sont 1 500 à 2 000 actuellement). Nous doublerons aussi notre entrepôt de données de recherche, fondé aujourd'hui sur près de 8 millions de données cliniques, génétiques et d'imagerie : elles sont à l'origine de nouvelles questions de recherche qu'*Imagine* a pour vocation de traiter. Enfin, nous tenons à pérenniser notre modèle grâce aux partenariats industriels et au mécénat pour anticiper l'arrivée à échéance en 2024 des financements du PIA. Une campagne grands donateurs devrait être lancée début 2021. Je suis confiant du résultat ! ■

Dossier réalisé par **DUOMEDIAS.**
Gilles Baron 06 82 84 11 02 gbaron@duomedias.fr – Rédaction : Carine Cheval – Maquette : Sylvie Bisson

SANOFI GENZYME

Maladies rares : la communauté, soudée au service des patients, amorce sa révolution diagnostique

Individuellement rares mais collectivement fréquentes. Aujourd'hui encore, les 7000 maladies rares recensées posent de sérieux défis en termes de diagnostic, de traitement et de qualité de vie. Les chercheurs, les laboratoires et les autorités de santé les relèvent ensemble au quotidien. Au sein de cette communauté soudée Sanofi Genzyme veut incarner l'espoir pour les malades et leurs proches aux côtés de tous les acteurs.

© FatCamera/Getty Images

Genzyme est une histoire de passionnés et de visionnaires qui ont commencé il y a 40 ans à travailler pour et avec les personnes atteintes de la maladie de Gaucher. Cet engagement les a conduits à créer un modèle de recherche et de financement pour des essais thérapeutiques dédiés. Cette entreprise pionnière a rejoint il y a dix ans Sanofi en conservant son idéal premier. « *En plus de nos six enzymothérapies pour des maladies de surcharge lysosomale et des deux traitements commercialisés dans les mois à venir, nous cherchons à changer la vie des patients et à apporter de la valeur à la communauté des maladies rares* », souligne le Dr Christian Deleuze, Directeur général de Sanofi Genzyme France et Président de Sanofi Genzyme Polyclonals. Notre credo : développer de nouveaux médicaments pour les maladies rares ou graves aux besoins médicaux non satisfaits. Il faut dire que le chantier est vaste : seules 500 maladies disposent aujourd'hui d'un traitement et la mise à disposition de biothérapies en nombre demeure un challenge. « Face à l'urgence, il faut oser agir pour que les choses avancent. » Avancer a pris un sens particulier pendant la crise du Covid-19. Sanofi Genzyme s'est mobilisé auprès des autorités de santé pour que certains patients traités à l'hôpital puisent l'être à domicile et que les essais cliniques se poursuivent parfois sous une forme adaptée.

suite page 78 ➥

SANOFI GENZYME

© Ismagilov / Getty Images

Avancer implique aussi de réduire l'errance diagnostique : 25 % des patients attendent près de quatre ans avant que la recherche de leur diagnostic ne débute. « C'est une souffrance de ne pas savoir. » En phase avec l'objectif du 3e Plan National Maladies Rares 2018-2022 d'accélérer l'orientation des malades vers un centre expert, Sanofi Genzyme a mobilisé 40 acteurs pour identifier les points de blocage du parcours de soins et proposer 14 solutions publiées dans son Livre Blanc UNIR : Innover ensemble pour réduire l'errance diagnostique dans les Maladies Rares. L'entreprise s'est même engagée à en appliquer une d'ici la fin 2021 : le déploiement d'une solution d'Intelligence Artificielle qui aidera les médecins à pré diagnostiquer les malades et les orienter plus vite vers le bon parcours de soin.

Une telle innovation suppose une implication forte des centres de référence et des filières maladies rares, souvent coordonnés par des médecins généticiens. C'est le cas du Pr Laurence Olivier-Faivre : responsable du Centre de génétique du CHU de Dijon, de la Filière AnDDI-Rares et du Centre de référence maladies rares « Anomalies du développement », elle se réjouit de la révolution diagnostique permise par l'arrivée du séquençage à haut débit de l'exome et du génome. « *Près de 60 % des patients sont désormais diagnostiqués et de nouvelles maladies rares ont été mises en évidence* », explique-t-elle.

Cette percée technologique s'est accompagnée d'une volonté politique forte. Le 3e Plan National Maladies Rares œuvre en pleine synergie avec le plan « Médecine France génomique 2025 » et les hôpitaux ont dû se réorganiser pour fédérer cliniciens, biologistes, bio-informaticiens et généticiens afin de faciliter le diagnostic.

Cette mobilisation se retrouve dans la structuration en centres de référence et filières. Les centres de référence offrent un accompagnement personnalisé grâce à leurs équipes pluridisciplinaires rassemblant psychologues, assistantes sociales, neuropsychologues, pédiatres, médecins pour adultes... Des structures de transition enfants-adultes, des programmes d'éducation thérapeutique et de nombreux canaux d'information ont été mis sur pied pour aider les patients et leurs proches à mieux comprendre et s'approprier la maladie.

Être acteur de sa maladie : c'est tout l'enjeu de la présence des associations de patients dans les comités de pilotage des filières. « Cela permet de s'adapter à leurs attentes. » Aujourd'hui, l'heure est à la professionnalisation des associations. « Nous avons lancé la formation "patients partenaires" pour la coanimation d'événements, de formations et de cours. » Un pas de plus a été franchi avec le lancement de 12 platesformes d'expertise maladies rares sur une base régionale. Le Pr Laurence Olivier-Faivre coordonne celle de Bourgogne-Franche-Comté. Les représentants des patients désireux de s'engager bénéficient d'actions de formation, d'information sur des thèmes fédérateurs et de conférences en ligne « Patients, familles, soignants ». « Cela élargit leurs perspectives et les aide à se sentir moins seuls avec leur maladie et leur souffrance. »

Aujourd'hui, l'heure est à l'optimisme. « *Le milieu des maladies rares est très dynamique et impliqué* », souligne le Pr Laurence Olivier-Faivre. La bienveillance est là, l'envie d'avancer aussi avec l'appui du ministère de la Santé qui organise tous les trimestres une réunion avec les responsables des filières. L'occasion d'échanger les expériences et de définir les projets à développer. Chaque Plan National Maladies Rares a permis une montée en compétence : une amélioration constante qui donne de l'espoir à toute la communauté. ■

28 février, Journée Internationale des Maladies Rares

© Ieorgijevic / Getty Images

Avec 3 millions de Français touchés et 5 % des pathologies bénéficiant d'un traitement, les maladies rares constituent une des cinq priorités de santé publique. Chaque année la communauté s'engage pour sensibiliser l'opinion, mobiliser la recherche en vue d'une meilleure compréhension des maladies rares et accélérer le diagnostic.
Un moment fédérateur pour Sanofi Genzyme qui soutient cette année l'événement organisé par la Filière Nationale de Santé AnDDI-Rares : un ciné-débat retransmis en visioconférence à 15h00 et ouvert à tous. : bit.ly/JourneeInternationaleDesMaladiesRares. La projection du film tiré de la pièce de théâtre *Le Tiroir – La Vie cachée* permettra de mieux comprendre l'impact du handicap sur la vie affective des patients.
Un deuxième rendez-vous est proposé le mardi 9 mars 2021 à 10h45 à tous les lycéens qui le souhaitent : bit.ly/LyceensDecryptageDesMaladiesRares.

IPSEN

L'acromégalie, une maladie invalidante en quête de reconnaissance

L'acromégalie fait partie des 7 000 maladies rares qui totalisent 3 millions de patients en France. Elle représente 5 nouveaux cas par an et par million d'habitants pour une prévalence de 40 patients par million d'habitants, soit près de 3 000 patients. Médecins et laboratoires font front commun avec les patients pour améliorer le diagnostic et la prise en charge.

« *L'acromégalie est due à une tumeur bénigne, l'adénome hypophysaire* », explique le Pr Thierry Brue, chef du Service d'Endocrinologie, Pôle ENDO (AP-HM), coordonnateur du Centre de Référence des Maladies rares de l'hypophyse (HYPO) et directeur de l'Institut MarMaRa (Marseille Maladies Rares). C'est l'hormone de croissance fabriquée en excès qui provoque la plupart des symptômes : rare gigantisme chez les enfants, impact sur le métabolisme et le fonctionnement de l'organisme chez les adultes. Si une cause génétique a été identifiée dans une minorité de tumeurs, la recherche clinique se poursuit pour en comprendre les causes, mieux connaître le retentissement de cet excès hormonal sur l'organisme et rechercher de nouvelles classes thérapeutiques pour réduire les effets secondaires des traitements par injection. « *Le traitement de base est l'ablation de la tumeur par neurochirurgie endoscopique mais elle ne guérit que la moitié des patients* », rappelle le Pr Brue. En attendant, il est urgent de rattraper le retard diagnostique de 5 à 10 ans, soutenir et autonomiser les patients au long cours. C'est tout l'intérêt du programme d'éducation thérapeutique conçu par HYPO en lien avec l'association de patients Acromégales, pas seulement…

Une écoute bienveillante et de vraies réponses médicales

Créée en 2015 par Stéphane Poupaux, diagnostiquée précocement, et Catherine Lançon, porteuse du gène AIP et mère d'un garçon atteint à l'adolescence, Acromégales, pas seulement… (APS) représente activement les patients et bénéficie de la caution scientifique du Pr Brue. Le militantisme de l'association a payé : passée de 36 à 104 adhérents en 2020 et 1 323 abonnés sur sa page Facebook, elle est aujourd'hui reconnue par la Société Française d'Endocrinologie et a contribué à changer le regard des médecins sur le vécu et les besoins des acromégales. Car chaque cas est unique : les symptômes divergent, les réactions à l'hormone de croissance et aux traitements aussi.

Pour la journée mondiale de l'acromégalie du 1er novembre, l'association participera à un podcast de la webradio Patients Ensemble. « *C'est une opportunité de favoriser l'autodiagnostic, sensibiliser les généralistes et faire reculer l'errance diagnostique* », souligne Stéphane Poupaux. Aujourd'hui, l'association cherche à grandir en s'appuyant sur le mécénat. Être suivi dans un centre de compétences, choisir le bon chirurgien et ne pas hésiter à faire des kilomètres pour bien se soigner : autant de conseils précieux pour rendre les acromégales acteurs de leur maladie. « *Il est possible d'avoir une vie presque normale même s'il y a peu d'espoir de guérison* », conclut Stéphane Poupaux. ■

Ipsen : une approche centrée sur les patients

IPSEN est un laboratoire engagé en oncologie, en neurosciences et en maladies rares. « *Voilà plus de 20 ans que nous nous sommes spécialisés dans plusieurs maladies rares : l'acromégalie, les tumeurs neuroendocrines, les troubles de la croissance et les dystonies cervicales* » explique le Dr Olivier Gattolliat, directeur médical pour IPSEN.

IPSEN a noué un partenariat avec APS dès sa création. Cette relation de confiance se traduit, chaque année, par de nombreux projets et notamment un projet récent, l'*AID-Acro* (Artificial Intelligence for Diagnosis in Acromegaly). Grâce à l'intelligence artificielle, *via* un algorithme défini en collaboration avec les experts et l'association, les médecins généralistes contribuent à réduire l'errance diagnostique des patients atteints d'acromégalie. Un outil précieux pour détecter précocement les cas d'acromégalie et orienter les patients vers un spécialiste endocrinologue pour une prise en charge adaptée. En outre, IPSEN participe chaque année à la journée mondiale de l'acromégalie et soutient la recherche des centres experts pour améliorer la prise en charge des patients et la vie de leurs proches. À l'occasion de la Journée Internationale des Maladies Rares, IPSEN lancera une campagne intitulée « Mes injections & Moi » à destination des patients acromégales pour les aider à mieux vivre leur traitement.

IPSEN s'intéresse également à une autre maladie rare qu'est la fibrodysplasie ossifiante progressive (FOP ou maladie de l'homme de pierre) et espère mettre à disposition des solutions thérapeutiques dans cette pathologie actuellement sans traitement.

+ d'infos : http://www.mes-injections-et-moi.fr/acromegalie

Sur la trace des Romains en Chine

Des découvertes troublantes se sont multipliées ces dernières années en Asie. Bains publics inspirés des thermes romains, statuette de guerrier, étoffes, objets en verre soufflé… Les Romains se seraient-ils rendus dans l'empire du Milieu ?

Par Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

L'INSTANT EST SOLENNEL. En 166 de notre ère, deux Occidentaux sont introduits à la cour de l'Empire céleste. Ils se présentent comme des ambassadeurs de Rome, la capitale d'un empire dirigé à l'époque par Marc Aurèle. Ils déposent des défenses d'éléphants, une corne de rhinocéros et des écailles de tortues aux pieds de l'empereur de Chine — le « Fils du Ciel » — qui les observe en pensant sans doute qu'il s'agit là d'un présent diplomatique somme toute assez modeste, sans rapport avec la richesse de cette Rome fort lointaine dont on lui a parlé. Depuis longtemps déjà, le souverain chinois sait en effet qu'un autre grand empire existe de l'autre côté du monde. Mais ces hommes qui s'en disent les envoyés en sont-ils vraiment des représentants officiels ? À les regarder, il lui semble plus probable qu'il s'agit de marchands occidentaux qui ont sans doute rencontré des difficultés dans leurs pérégrinations et ont usurpé ce titre d'émissaires de Rome pour se tirer d'affaire. Il n'empêche : cette rencontre est historique.

BRUNO BOURGEOIS

Les fouilles entreprises dans plusieurs sites, notamment en Chine et en Mongolie, ont permis de mettre au jour des objets de facture romaine.

L'intérêt pour cette anecdote, minutieusement décrite dans le *Hou Hanshu* (*Livre des Han postérieurs*), une chronique compilée au Ve siècle après J.-C. à partir de documents remontant au IIe siècle après J.-C., vient de resurgir sur les bords du lac Léman. Une équipe de chercheurs helvéto-chinoise s'est en effet constituée pour replonger dans ces liens ancestraux. Son objectif ? Mieux appréhender l'axe d'échanges commerciaux qui aurait pu exister dans le sens Rome-Chine, beaucoup moins connu que l'axe inverse appelé « routes de la soie », et les traces archéologiques qui pourraient en subsister. Car à la faiblesse des sources écrites grecques et latines sur la Chine, située à plus de 8000 kilomètres à l'est de Rome, répond en effet la prolixité des chroniques de l'Empire du Milieu. Elles font régulièrement référence au monde romain (*Da Qin*), alors que l'État chinois (appelé *Thina* dans le *Périple de la mer Rouge* rédigé en grec à Alexandrie (Égypte) entre le Ier et le IIIe siècle après J.-C.) est rarement évoqué dans les sources occidentales.

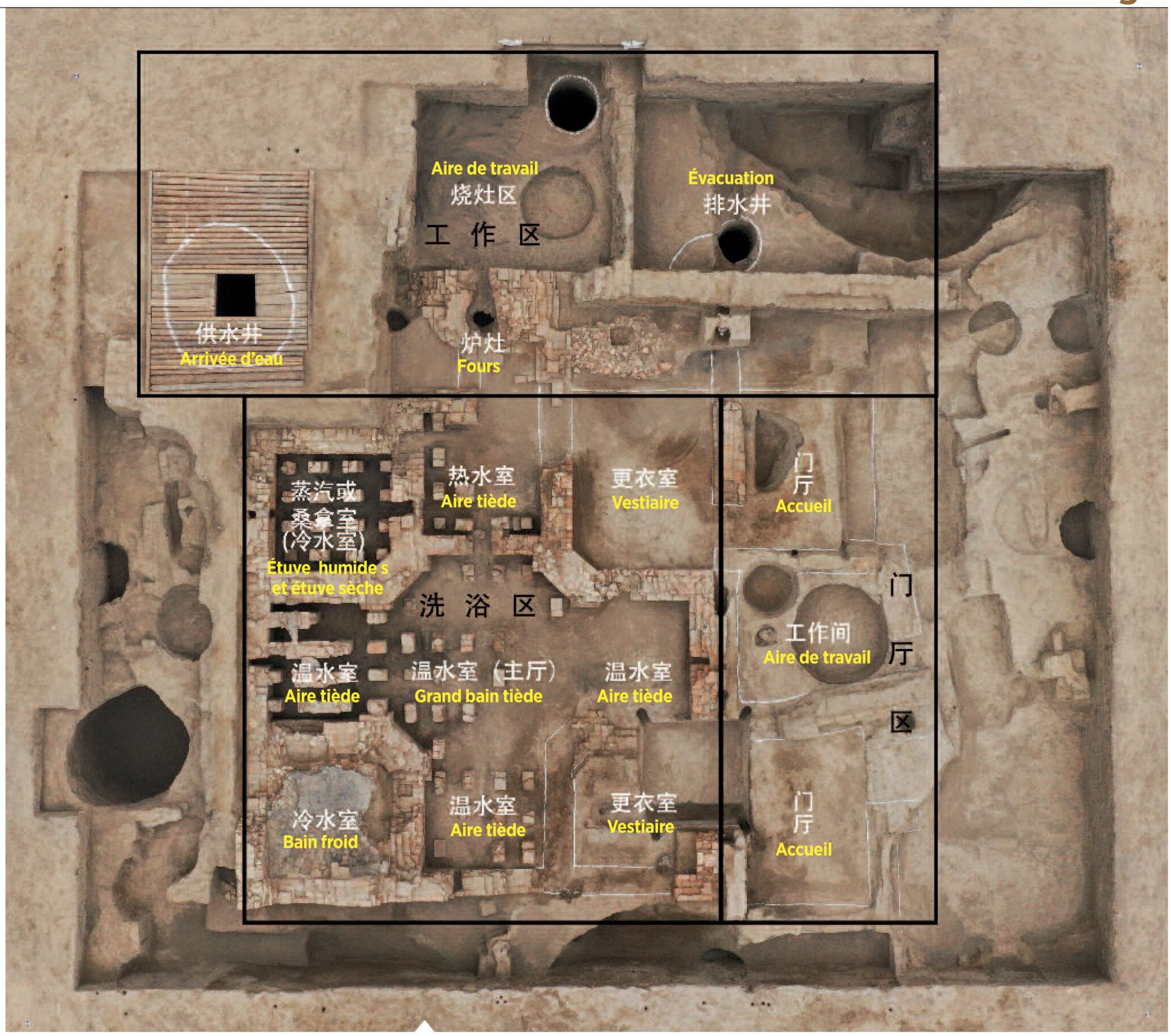
Un système inédit de chauffage par le sol

Lorenz Baumer, professeur d'archéologie classique au Département des sciences de l'Antiquité de l'université de Genève (Suisse), a donc récemment pris contact avec son homologue chinois, le professeur Jian Wei. Bonne pioche ! Ce dernier, qui a fouillé durant quatorze ans la cité de Xanadu (Shangdu), en Mongolie intérieure, la première capitale du

JIAN WEI

« Nous avons mis au jour des bains publics de style romain au Xinjiang, une découverte sans précédent en Chine »

Jian Wei, professeur d'archéologie à l'université du Peuple, à Pékin (Chine)



DR. JIAN WEI/ UNIVERSITÉ RENMIN/BEIJING

Les vestiges des thermes de l'ancienne ville de Tangchaodun, dans la province du Xinjiang (vue aérienne), datent du Xe siècle. Le bâtiment est construit sur le principe des bains romains : le niveau inférieur accueille un système de chauffage par le sol. Les différentes pièces (bains tiède et froid, salles froide et chaude...) se partagent le niveau supérieur.

Mongol Kubilai Khan, venait en effet de faire une découverte surprenante. « *Nous avons mis au jour des bains publics de style romain dans la préfecture autonome de Changji Hui, au Xinjiang, une découverte sans précédent en Chine !* explique à *Sciences et Avenir* le professeur d'archéologie à l'université du Peuple (Pékin). *Cela fait plusieurs années que je m'intéresse aux preuves de contacts qu'il y a pu avoir entre l'Empire romain et les différentes dynasties chinoises. Cette découverte est fantastique.* » Cet établissement de bains a été dégagé lors de fouilles menées dans l'ancienne ville de Tangchaodun, dans le district de Qitai, au nord-ouest de la province du Xinjiang. « *Même si ces constructions ont été érigées tardivement, au Xe siècle, elles s'inscrivent indubitablement dans la tradition architecturale romano-byzantine*, poursuit Jian Wei. *Le bâtiment, construit en brique, est doté d'un système de chauffage par le sol appelé hypocauste* [système utilisé dans l'ensemble de l'Empire romain], *une technique totalement inconnue en Chine.* » Une preuve de la diffusion de la culture balnéaire romaine jusqu'au pied des montagnes des Tian Shan, au nord-ouest du bassin du Tarim.

Depuis trois ans, Lorenz Baumer et Jian Wei ont ainsi établi un contact fructueux par le biais d'échange d'objets, de photos, de documents stratigraphiques, ou de cartes... Autant de preuves de ces contacts antiques Ouest-Est, comme cette statuette en bronze de 40 cm de haut représentant un guerrier agenouillé datée du IVe ou IIIe siècle avant J.-C. Elle a été exhumée dans le district de Xinyuan, dans la province occidentale du Xinjiang. « *La tunique et le casque ainsi que la posture de la figurine reflètent des modèles hellénistiques et romains, inconnus à l'époque en Chine* », explique ▸

Un guerrier vêtu d'une tunique et coiffé d'un casque typiques des époques hellénistique et romaine figure sur cette statuette en bronze. Datée du IVe ou IIIe siècle avant J.-C., la figurine a été mise au jour dans le district de Xinyuan.

Ce gobelet, daté du Ier siècle, retrouvé en Mongolie intérieure, a été fabriqué en Italie du Nord.

Fragment d'étoffe de laine, découvert dans la nécropole de Sampula (province du Xinjiang). Il montre un homme aux traits occidentaux, avec au-dessus un centaure jouant d'un instrument à vent.

Lorenz Baumer. De même pour les textiles. Déjà, lorsqu'il travaillait à Palmyre (Syrie), au sein de l'équipe de l'Institut allemand, Lorenz Baumer avait été ébloui par la découverte d'un fragment de tissu venu de Chine. Ces vestiges confirmaient que depuis bien longtemps, les hommes et les femmes d'Orient et d'Occident échangeaient de fabuleux textiles, et biens d'autres produits précieux. Ainsi ce coupon d'étoffe de laine mis au jour en 1984 dans la tombe 1 de la nécropole de Sampula, dans la province du Xinjiang, au nord-ouest de la Chine. *« On y voit la tête et la partie supérieure du corps d'un homme clairement occidental armé d'une lance, avec dans le champ supérieur, un centaure jouant de la musique »*, détaille le spécialiste. Autre témoignage, un miroir représentant un satyre et une ménade, exhumé dans la nécropole de Noin-Ula dans la province de Töv, en Mongolie. Sans compter les nombreux objets en verre soufflé, une technique inconnue dans l'empire du Milieu jusqu'à la fin du VIe siècle. *« Un gobelet du Ier siècle, presque intact, fabriqué en Italie du Nord, a été trouvé en Mongolie. Et des fragments de verre apparentés, également du début de l'Empire romain, ont été découverts dans la ville de Hanjiang, au Jiangsu* [est de la Chine], *dans une tombe du Ier siècle après J.-C. »*, poursuit Lorenz Baumer.

Les « arbres à laine » décrits par Pline l'Ancien

Des monnaies romaines et byzantines ont aussi trouvé le chemin de la Chine. Une centaine de pièces, principalement en or, ont été collectées, datées du IVe au VIIIe siècle. Une plaque d'argent doré montrant Dionysos chevauchant une panthère a également été découverte près de Jingyuan, dans la province du Gansu (nord-ouest de la Chine) en 1988. *« Nous possédons aussi une stèle à Xi'an érigée en janvier 781 qui décrit les cent cinquante premières années de l'histoire de l'arrivée des nestoriens* [une branche du christianisme oriental apparue au Ve siècle] *en Chine »*, indique Jian Wei.

Ce travail de compilation induit un vrai bouleversement dans les études. Jusque-là, seule l'importation des soies sériques (du pays des Sères, la Chine) était amplement décrite en Occident. Dans les tombes de Palmyre, citées plus haut, les chercheurs ont en effet trouvé un nombre remarquable de tissus en soie de la période Han (206 avant J.-C./220 après J.-C.), dont l'origine chinoise est incontestable en raison de la technique de tissage et de la représentation de dragons ou de caractères

PHOTOS : AKG IMAGES - ERDENEBAATAR DIIMAAJAV

UNIVERSITÉ DE GENÈVE. PHOTO : ALEXANDRE BOURQUIN, 2021

« À Rome, les dépenses en tissus de soie, que certains considéraient comme immorales, ont suscité de vives critiques »

Lorenz Baumer, professeur d'archéologie classique au Département des sciences de l'Antiquité de l'université de Genève (Suisse)

chinois. L'une des pièces les plus anciennes est d'ailleurs un fragment de « damas han » du Ier siècle avant J.-C., qui a été découvert dans la tour funéraire d'Atenatan, à Palmyre. L'écrivain romain Pline l'Ancien (23-79) décrit dans son *Histoire naturelle* des « arbres à laine » dont proviendrait la soie tissée de manière serrée par les Chinois puis dévidée et retissée de façon plus lâche par les tisserands romains. Cette méthode permettait de multiplier les profits, et était moquée en Chine, comme le révèle le texte du *Wei luë* écrit en 239-265 de notre ère : *« [Les Romains] faisaient toujours des bénéfices en se procurant les épais tissus de soie monochromes en Chine, qu'ils divisaient pour produire des tissus de soie avec des motifs étrangers [...] Par une telle variété de travaux, amenés d'un monde si lointain, il est possible de faire apparaître les matrones translucides en public. »* D'Horace à Martial, les poètes romains évoquent la finesse de la soie qui habille le corps des femmes sans rien en dissimuler.

Un commerce fructueux réalisé par des intermédiaires

Au IIIe siècle, l'usage de la soie deviendra général, hommes et femmes de la haute société s'en parant. La soie sera dès lors le symbole du luxe indécent et de l'homme déliquescent. *« À Rome, les dépenses en soie, que certains tenaient pour immorales, ont suscité de vives critiques »*, rappelle Lorenz Baumer. *« Selon l'estimation la plus basse, l'Inde, les Sères et cette péninsule* [l'Arabie] *volent à notre empire 100 millions de sesterces chaque année : voilà ce que le luxe et les femmes nous coûtent ! »*, s'emporte ainsi Pline l'Ancien. *« Les contacts directs entre Rome et la Chine ont cependant été limités car les échanges commerciaux et culturels ont souvent été réalisés par des tiers »*, précise Jian Wei. Et pour cause. Les Parthes, qui tiraient leur principale richesse du commerce de la soie, ont toujours jalousement veillé à ce que les deux empires n'entrent pas en contact direct pour garder leur rôle fructueux d'intermédiaires. Sans compter que les régions traverser devinrent vite très dangereuses lors des invasions des Ve-VIe siècles (Huns, Mongols, etc.).

L'étude des relations entre Rome et la Chine n'en est qu'à ses débuts. Des spécialistes chinois viennent désormais régulièrement se former en Europe pour mieux connaître les pièces de l'antiquité romaine de façon à pouvoir les identifier sur le terrain. Une recherche rendue cependant difficile par le fait que de nombreux résultats de fouilles en Chine ne sont pas accessibles aux chercheurs occidentaux et ne font pas l'objet de publications. Si l'actuelle pandémie de Covid-19 a freiné les échanges, ils devraient reprendre au plus vite, selon Lorenz Baumer, très enthousiasmé par ces premiers résultats. ■

KATHARINA HESSE/LAIF-REA

Vêtus d'une tunique, coiffés d'un casque et armés d'un glaive, les habitants de la région de Liqian (Gansu) organisent depuis quelques années un spectacle de combats de légionnaires romains.

LÉGENDE

L'invention d'une tradition

Une légende tout à fait étonnante est solidement implantée dans l'actuelle province du Gansu (Chine). Connue sous le nom de « légende des Romains de Liqian », elle serait attribuée à un certain Marcus Licinius Crassus. Cette histoire, qui en réalité trouve son origine dans le livre du Britannique Homer Hasenpflug Dubs dans *A Roman City in Ancient China* (1957). Il y raconte que des légionnaires romains capturés par les Parthes lors de la bataille de Carrhes, en 53 avant J.-C., auraient été déportés en Extrême-Orient. Si aucune preuve n'a jamais été apportée, La tradition est si vivace que les habitants de l'ancienne région de Liqian organisent depuis quelques années des spectacles. Ils portent alors javelot (*pilum*), glaive, casque (*galae*), bouclier et tunique et se lancent dans des batailles de « légionnaires romains ». Les recherches novatrices que mènent le chercheur suisse Lorenz Baumer et son homologue chinois Jian Wei sur les relations entre l'Empire romain et la Chine connaissent sur place un engouement croissant, et plus largement auprès du public chinois habitué à entendre depuis des siècles des contes s'y rapportant.

MAXIME AUBERT/GRIFFITH UNIVERSITY/AFP

Découverte dans la grotte de Leang Tedongnge sur l'île de Sulawesi, en Indonésie, la peinture (54 cm x 1,36 m) a été tracée à l'ocre rouge.

La plus ancienne peinture rupestre se trouve en Indonésie

Vieille de plus de 45 000 ans, cette figure réalisée sur les parois d'une grotte indonésienne serait une représentation de cochon sauvage. La première création artistique connue.

CE SERAIT UN NOUVEAU RECORD : une peinture rupestre réalisée il y a 45 500 ans — alors que les œuvres pariétales de la grotte Chauvet (Ardèche), en France, ne remontent « qu'à » -37 000/-33 500 ans ! Elle a été découverte par des archéologues de l'université Griffith à Brisbane (Australie) lors de prospections dans une cavité du sud de l'île indonésienne de Sulawesi (Célèbes). Tracée à l'ocre rouge, la silhouette est celle d'un cochon sauvage. Plus précisément, un suidé endémique de l'île : le cochon verruqueux de Sulawesi (*Sus celebensis*). Alors qu'elle vient tout juste d'être publiée dans la revue *Science Advances*, cette découverte aurait été faite en 2017. Haute de 54 cm pour 1,36 m de long, l'effigie de l'animal à courtes pattes est représentée avec les excroissances faciales typiques des adultes mâles de l'espèce.

L'ocre avec laquelle les peintures sont tracées ne pouvant être datée directement, les scientifiques ont prélevé des échantillons de calcite recouvrant les figures. Ces dépôts de carbonate de calcium se forment naturellement sur la surface des parois rocheuses. Grâce à une analyse par la méthode de l'uranium-thorium, Maxime Aubert, de l'université Griffith, a pu dater ces dépôts de -45 500 ans. Conclusion : la peinture située au-dessous est au moins aussi ancienne. Les chercheurs australiens ont en outre conduit des fouilles archéologiques dans des sites ornés voisins (à Leang Bulu et Leang Burung 2), ce qui leur a permis de collecter des pigments et fragments d'ocre dans des niveaux de sédiments vieux de plus de 40 000 ans.

Ce n'est pas la première fois que cette région du monde vient bousculer l'histoire des premières créations artistiques. En 2019, la même équipe de scientifiques avait déjà publié des datations très anciennes — d'au moins -43 900 ans — pour une autre scène rupestre sur le site de Bulu Sipong 4, dans la même région du sud de Sulawesi. On y voyait des personnages hybrides en train de poursuivre une bande de cochons sauvages.

Elle comble des lacunes dans les migrations humaines

Ces datations sont également des preuves archéologiques de l'ancienneté de la présence humaine dans ce vaste espace d'îles, porte d'entrée du continent australien, où les premiers humains anatomiquement modernes sont arrivés il y a 65 000 ans. Elles comblent des lacunes dans l'histoire des migrations humaines autant que dans celle de l'art pariétal préhistorique. Et d'autres découvertes pourraient se produire : « *Il n'est pas exclu que des datations encore plus reculées, apparaissent dans le futur* », estime Carole Fritz, spécialiste d'art préhistorique, (CNRS), responsable du Centre de recherche et d'études pour l'art préhistorique Émile-Cartailhac (CREAP), à Toulouse. ■

Bernadette Arnaud

@NarudaaArnaud

Dans le secret des blancs de Léonard de Vinci

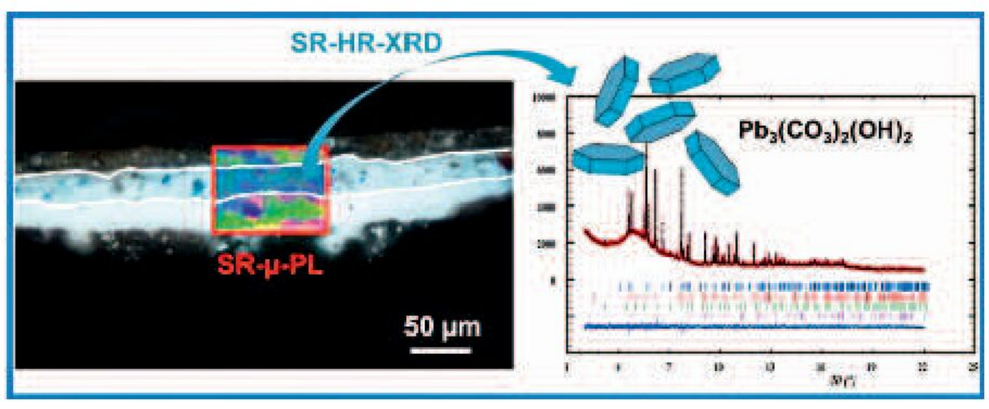
Une équipe de chercheurs a découvert que le maître de la Renaissance italienne utilisait différentes qualités de blanc de plomb. Il établissait ensuite ses propres mélanges pour reproduire la nature le plus fidèlement possible.

Entre cascades et montagnes, la Vierge Marie est assise sur les genoux de sa mère, sainte Anne. Toutes deux regardent d'un air contemplatif l'Enfant Jésus posé au sol, qui joue avec un agneau. Ce tableau de Léonard de Vinci, La Vierge, l'Enfant Jésus et sainte Anne, peint entre 1503 et 1519 et aujourd'hui exposé au Louvre, vient de livrer l'un de ses secrets : celui de la couleur blanche utilisée par le maître de la Renaissance italienne. Des chercheurs du CNRS ont eu l'autorisation exceptionnelle d'analyser un échantillon de peinture prélevé au niveau de l'arrière-plan, sur le liseré de la montagne. Certes un échantillon minuscule, à peine quelques micromètres d'épaisseur pour 100 µm de longueur, mais suffisant pour livrer aux chercheurs les spécificités chimiques de cette teinte.

Une deuxième couche plus riche en cérusite

L'analyse s'est déroulée en deux temps, au synchrotron Soleil (sur le plateau de Saclay, près de Paris) et à l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, à Grenoble), deux accélérateurs d'électrons dont le microfaisceau génère des rayons X qui permettent de sonder la matière. « *Il s'agit de bombarder l'échantillon avec un rayonnement très énergétique et focalisé. Cela permet d'avoir une analyse très précise de la matière* », explique Victor Gonzalez, scientifique du patrimoine, spécialisé en études chimiques des pigments historiques et auteur de l'article paru dans *Scientific Reports*. Verdict : Léonard de Vinci a utilisé non pas une mais deux couches différentes de blanc sur sa toile. « *Le blanc de plomb est fabriqué à partir de pigments blancs, les carbonates de plomb. Ces derniers sont composés de deux minéraux, la cérusite et l'hydrocérusite, dans des quantités différentes selon la manière dont la peinture a été préparée. Ici, la première couche de couleur est riche en hydrocérusite, ce qui est classique à la Renaissance italienne. Au contraire de la deuxième couche, plus riche en cérusite* », explique Victor Gonzalez. L'équipe a pu confirmer que cette manière de procéder était bel et bien voulue par le peintre en consultant ses carnets. Ils y ont trouvé une liste de courses à faire au marché aux couleurs, où les pigments s'achetaient à l'époque. « *On y retrouve du blanc de plomb à deux prix différents.* »

C2RMF



VICTOR GONZALEZ

Un échantillon (flèche blanche) prélevé dans l'arrière-plan de *La Vierge, l'Enfant Jésus et sainte Anne* a été soumis à l'analyse synchroton (en bas) pour déterminer la composition chimique du pigment.

Un voile bleu pour donner une impression de lointain

Les scientifiques émettent en outre l'hypothèse que le peintre diluait certains blancs de plomb chez lui au vinaigre blanc pour dissoudre des particules de saleté. Il obtenait ainsi un mélange plus riche en cérusite et la peinture prenait une teinte légèrement bleutée. Or dans un autre écrit, Léonard « *écrit que le ciel est bleu parce qu'il y a des particules d'eau dans l'atmosphère*, souligne Victor Gonzalez. *Il savait par ailleurs que ce qui se trouve loin prend une teinte bleutée, et a très bien pu vouloir donner un voile bleu à la montagne à l'arrière-plan.* » En utilisant un mélange de son invention, il parvint ainsi à la reproduction la plus fidèle possible. ■

Coralie Lemke @CoralieLemke

« La paléogénétique donne un visage au passé »

Depuis trente ans, l'étude des génomes anciens a permis de résoudre des questions jusque-là insolubles, comme certaines migrations de populations, explique Ludovic Orlando.

LUDOVIC ORLANDO

Ludovic Orlando est docteur en biologie, spécialiste de paléogénétique, et directeur de recherche au CNRS. Il dirige le centre d'anthropologie et de génomique à l'université Paul-Sabatier à Toulouse depuis 2020, après dix ans à l'université de Copenhague (Danemark). Il a réalisé le séquençage du plus ancien génome, celui d'un cheval vieux de 700 000 ans.

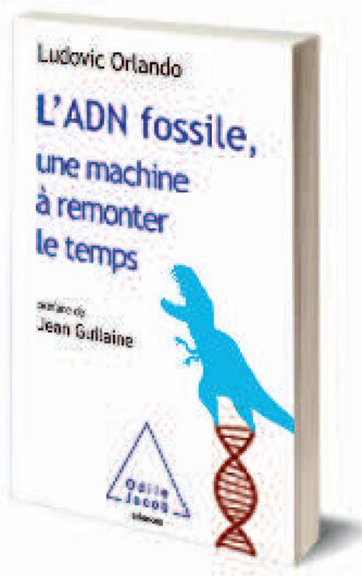
« Ce qui est fabuleux avec la paléogénétique [l'étude des génomes anciens], c'est qu'elle met un visage sur le passé, elle rend visible ce qui aurait disparu parce que non fossilisable sous forme d'os ou de dent : la couleur de peau, les processus de domestication des animaux, ce qu'il y a dans l'environnement, etc. De fait, elle enrichit l'archéologie d'une manière assez prodigieuse.

Prenez l'exemple d'Inuk, premier génome humain ancien entièrement séquencé, en 2010. J'ai eu la chance de participer à ce travail. Inuk est un homme qui a vécu au Groenland il y a environ 4000 ans, il est donc relativement jeune par rapport à d'autres génomes anciens séquencés, comme celui de Neandertal mais, grâce au séquenceur de nouvelle génération le plus puissant à l'époque, nous sommes parvenus à lire chaque lettre de son génome vingt fois, là où il était difficile de les lire plus d'une fois. Collecter cette information et la vérifier avec une telle redondance nous a permis de dresser un portrait-robot d'Inuk beaucoup plus riche et concret qu'avec les seuls outils de l'archéologie : nous avons établi que son groupe sanguin était A+, qu'il avait un risque accru de développer une calvitie, qu'il était résistant au froid, que sa couleur de peau était foncée et celle de ses yeux, noisette, etc. Cela nous a aussi donné accès, pour la première fois, aux génotypes, c'est-à-dire à l'information génétique héritée du père et à celle héritée de la mère. C'était fabuleux, l'un des moments les plus excitants de ma carrière, je pense !

De mémoire, je dirais que nous avons réussi à obtenir le génotype de 350 000 endroits du génome d'Inuk. Comme nous possédons une information équivalente pour de nombreux hommes et femmes vivant aujourd'hui sur tous les continents, nous nous sommes demandé si l'on pourrait déterminer de quelles populations du monde actuel il est le plus proche. Fort heureusement, les outils mathématiques pour établir cela ne manquent pas.

On aurait pu penser qu'Inuk habitant dans le sud-ouest du Groenland était très proche, génétiquement parlant, des Inuits vivant sur place aujourd'hui. Mais ce n'est pas ce qu'on a trouvé. On a découvert qu'il s'apparentait davantage aux Tchouktches et aux Youkaguirs qui habitent les territoires de l'extrême nord-est de la Sibérie. Ce qui signifie que contrairement à ce que l'on pensait jusque-là, il n'y a pas eu qu'une seule vague de peuplement du Groenland ; celle dont sont issus les Inuits a été précédée par une autre, que seule l'analyse de l'ADN ancien a permis de mettre au jour.

De la même manière, la paléogénétique a permis de découvrir une branche de l'évolution humaine, les dénisoviens. Le côté prodigieux de cette découverte, c'est qu'elle s'est faite à partir de rien ou presque : une demi-phalange d'une fillette, à peine 60 milligrammes de matière. Et donc, tout à coup, grâce à l'analyse ADN de ce fossile, a été mise en évidence une mitochondrie très divergente de celle d'*Homo sapiens* et de Neandertal. Les chercheurs ont d'abord pensé qu'il s'agissait



EXTRAIT

« Au milieu des années 2000, le monde des technologies de séquençage de l'ADN allait connaître une profonde révolution avec l'essor de tout nouveaux instruments [capables de] générer de très nombreuses réactions de séquençage en parallèle en des temps records et d'être limités quant à la taille des séquences obtenues [...]. Pour ceux qui manipulaient de l'ADN ancien, qui subsiste au mieux à l'état de modestes fragments, la technologie semblait taillée sur mesure. [...] Nous pourrions obtenir des séquences néandertaliennes par millions en à peine quelques jours, là où [l'on peinait] à en produire quelques dizaines dans le même intervalle. »

L'ADN fossile, une machine à remonter le temps, Ludovic Orlando, Odile Jacob, 256 p., 22,90 €.

SCIENCE PHOTO LIBRARY/JAVIER TRUEBA/MSF

Forage du fémur d'un « Homo heidelbergensis » vieux de 400 000 ans afin d'en extraire de l'ADN pour le séquencer.

d'un reste d'*Homo erectus*, c'est-à-dire de l'ancêtre commun à Neandertal et à nous, *Homo sapiens*. Mais, en menant des études sur son ADN nucléaire, ils se sont rendu compte que ce fossile était plus proche de Neandertal que de nous, et donc qu'il s'agissait plutôt d'une branche parallèle, non identique, non superposable à celle de Neandertal, qui a vécu d'il y a 100 000/120 000 ans à 80 000 ans.

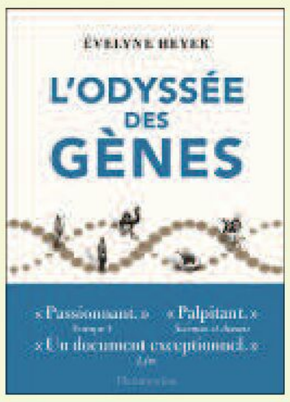
Et ce n'est pas juste un plaisir de l'esprit que de découvrir que, en même temps que Neandertal, Cro-Magnon et l'homme de Flores, vivait une quatrième espèce. Car nous conservons des traces de ces ancêtres. Nous avons ainsi 2 % de Neandertal dans notre génome. Les Papous, les habitants d'Océanie et une partie de ceux qui vivent sur le plateau asiatique continental ont, eux, de l'ADN dénisovien. La capacité d'adaptation des Sherpas de l'Himalaya à la vie en altitude, par exemple, est due à un variant génétique qui leur vient droit de Denisova, et qui a été sélectionné uniquement chez eux.

> « Les Sherpas de l'Himalaya ont un gène de dénisovien »

Il est donc très important, fondamental même, de caractériser ce passé, parce qu'il a des conséquences dans le présent : il conditionne l'état physiologique et médical de nos sociétés. » ■

Propos recueillis par Vincent Glavieux @vglavieux

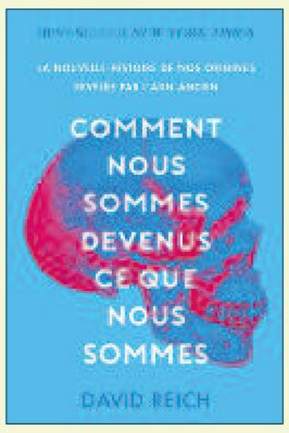
SUR LE MÊME THÈME



« Homo sapiens », espèce migratrice

VOYAGE Ce livre clair et vivifiant, qui convoque les derniers résultats de la génétique et de la paléoanthropologie, nous invite à un vertigineux voyage autour de la planète et à travers le temps. L'auteure, anthropologue et généticienne de terrain, montre comment *Homo sapiens* s'impose sur les continents, dompte la nature, et comment ces va-et-vient incessants, qui se poursuivent aujourd'hui — nous sommes une espèce migratrice, soutient-elle —, laissent des traces dans notre génome. Elle pose également des limites : l'identité génétique ne doit pas prendre trop de place, il faut laisser à chaque individu la liberté de se définir. **M. G.**

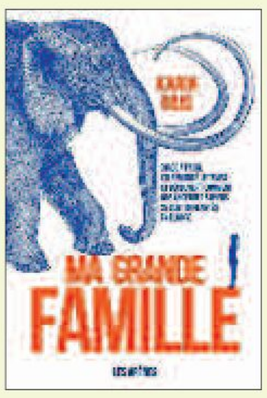
L'Odyssée des gènes, Évelyne Heyer, Flammarion, 388 p., 22,90 €.



Étudier les variations génétiques

HYBRIDATION David Reich dirige l'un des plus grands laboratoires de paléogénétique du monde, à l'université Harvard (États-Unis). Son livre suit les traces du peuplement de la planète par *Homo sapiens*, et des nombreuses hybridations de populations qui se sont ensuivies. Foisonnant, l'ouvrage défend aussi l'idée que, malgré ces hybridations, l'humanité est constituée aujourd'hui de populations diverses, dont les caractères génétiques varient en moyenne. Ces variations, soutient-il, doivent être étudiées afin d'empêcher la construction de nouveaux mythes racistes. Un point de vue qui ne manquera pas de susciter le débat. **V. G.**

Comment nous sommes devenus ce que nous sommes, David Reich, Quanto, 380 p., 24,50 €.



De l'histoire familiale à celle de notre espèce

PÉRIPLE La mort d'un proche est toujours une expérience douloureuse. Après le décès de sa mère, Karin Bojs éprouve le besoin et l'envie de se plonger dans sa généalogie. Elle se soumet à un test ADN et débute ainsi son périple dans l'histoire familiale. L'aventure ne tarde pas à prendre une autre dimension, à mesure que la journaliste scientifique suédoise entremêle à son histoire personnelle celle de notre espèce, *Homo sapiens*. Une évocation plaisante, où l'on retrouve des étapes clés de l'histoire de l'humain moderne (invention de la poterie, domestication du chien, etc.). **V. G.**

Ma Grande Famille, Karin Bojs, Les Arènes, 470 p., 20 €.

C'EST À LIRE

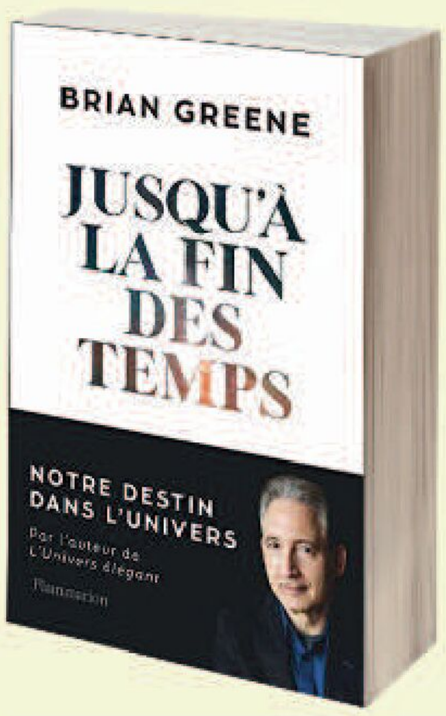
ESO/B. BAILLEUL

Les lois de la physique qui permettent de décrire l'Univers (ici, la nébuleuse du Casque de Thor) pourraient un jour, selon Brian Greene, nous éclairer sur l'émergence de la conscience humaine.

Le mystère de la vie

Le physicien et mathématicien américain Brian Greene s'interroge sur l'émergence du vivant et son évolution.

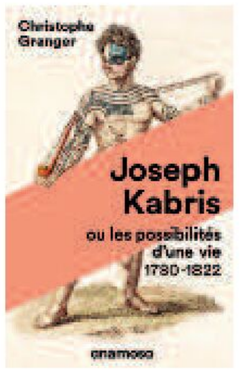
QUÊTE *« Une étincelle de lumière entre deux éternités de ténèbres »* : cette définition de l'existence humaine donnée par l'écrivain Vladimir Nabokov dans son autobiographie *Autres Rivages* (1951) sert de guide à Brian Greene, physicien et mathématicien à l'université Columbia à New York (États-Unis), tout au long de cet ouvrage. Mais l'auteur étend la définition à la vie en général, ce phénomène apparu mystérieusement il y a environ 4 milliards d'années (en tout cas sur Terre) et qui disparaîtra à coup sûr avec la fin de l'Univers (*lire* S. et A. *n° 887, janvier 2021*). L'auteur de plusieurs ouvrages de vulgarisation à succès (*L'Univers élégant*, *La Magie du cosmos*), nous entraîne ainsi dans un passionnant voyage d'un bout des ténèbres à l'autre. Il revient sur le Big Bang, la formation des premiers atomes, la naissance des étoiles, etc. et explore jusqu'aux différents scénarios de fin de l'Univers. Entre les deux, il évoque l'émergence du vivant, et son évolution… *(Lire* La Recherche*, février/avril 2021)* Mais toujours avec son regard de physicien, ce qui rend l'approche originale. Notamment, il s'interroge : puisque la physique décrit avec précision les atomes et les lois qui les régissent, pourrons-nous un jour comprendre l'émergence de la conscience au sein de nos cerveaux, qui ne sont après tout qu'un rassemblement d'atomes en interaction ? Brian Greene ne l'exclut pas, et espère que cette connaissance ultime résoudra quelques-unes de nos interrogations existentielles, notamment notre angoisse par rapport à la mort et la disparition inévitable de toute chose. En attendant, de manière plus personnelle, il estime que faire avancer la science, s'adonner à un art ou fonder une famille nous permettent de vaincre cette angoisse en nous donnant l'impression que quelque chose de permanent nous survivra. Bien d'autres l'ont dit avant lui, notamment le psychothérapeute et écrivain Irvin Yalom (*Le Jardin d'Épicure*, 2015), mais l'intérêt ici est surtout de suivre Brian Greene dans sa quête érudite mêlant physique, biologie, philosophie, théologie et littérature. Parfois, le voyage vaut mieux que la destination. ■ **Fabrice Nicot**



Jusqu'à la fin des temps. Notre destin dans l'Univers, Brian Greene, Flammarion, 512 p., 23,90 €

L'étrange destinée

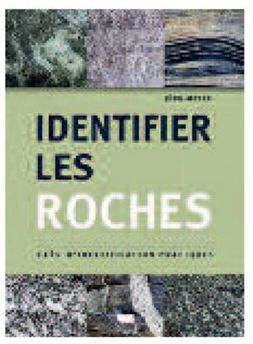
ENQUÊTE Comment se fait une vie ? Joseph Kabris, jeune Bordelais embarqué sur un baleinier, échoue dans une île des Marquises (Pacifique) vers 1795, devient « sauvage », épouse la fille du « roi » et son corps est entièrement tatoué en bleu. En 1804 un navire russe l'arrache à son île : il débarque en Russie, rencontre le tsar, et vit en exhibant son corps et en racontant son aventure. Il retrouve enfin la France, où de foire en foire, jusqu'à sa mort, il s'expose. Cette enquête sur des faits réels décrit la dynamique d'une vie, la façon dont on transfère des expériences acquises d'un univers à un autre, les articulations entre présent et passé, ce qui relève de l'individu et du contexte social. Passionnant. ■ **A. De B.**



Joseph Kabris ou les possibilités d'une vie. 1780-1822, Christophe Granger, éd. Anamosa, 512 p., 26 €

Guide géologique

IDENTIFICATION Après d'utiles notions de bases de la géologie (structures des roches, fossiles, équipement, méthodes, etc.), ce guide propose des clés d'identification novatrices et pratiques des roches : plutoniques, volcaniques, sédimentaires et métamorphiques. Plus de 300 types de roches sont présentés et classés par groupes, à l'aide de 460 photographies, 75 graphiques et illustrations. Cette approche ne nécessite pas de connaissances approfondies en géologie, mais un peu de patience et de persévérance, ainsi qu'une loupe et une lame d'acier. Pour les cas difficiles, les risques de confusion sont signalés afin de pouvoir déterminer au moins la famille de roches concernée. ■ **R. M.**



Identifier les roches, Jürg Meyer, Delachaux et Niestlé, 144 p., 25,90 €

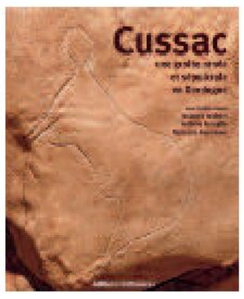
Hommage à Alfred Wallace

ÉVOLUTION En 1858, le célèbre naturaliste Charles Darwin reçoit une lettre troublante : Alfred Russel Wallace, son ami et collecteur d'insectes lui décrit par le menu les ressorts de la sélection naturelle, celle-là même sur laquelle il travaille depuis vingt ans ! Les deux hommes ont découvert parallèlement le mécanisme au cœur de l'évolution… Pourtant, l'histoire retiendra surtout le nom de Darwin. Ce livre somptueusement illustré rend à Wallace sa véritable place. De ses modestes débuts d'autodidactes, à ses expéditions et aventures en Amazonie et au sein de l'archipel malais, où il creusa et éclaircit, en une poignée d'années seulement, les mystères de la répartition géographique des espèces. ■ **R. M.**

Le Rival de Darwin, Christiane Dorion, Delachaux et Niestlé, 64 p., 18 €

Cussac, le « Lascaux de la gravure »

ENFANCE DE L'ART Elle est la dernière des grandes cavités ornées à avoir été découverte en France. Depuis 2000, La grotte de Cussac, située au Buisson-de-Cadouin, en Dordogne, avec ses 800 gravures monumentales et sa galerie de 1,6 km de long n'a cessé de livrer ses vertigineux témoignages. Jusqu'à la présence de rarissimes ossements humains remontant au gravettien. Abondamment illustré, le présent ouvrage constitue une synthèse des deux dernières décennies de recherche réalisées dans ce site unique parmi les plus spectaculaires de tout l'art pariétal européen. Une grotte que les spécialistes n'hésitent pas à qualifier de *« Lascaux de la gravure »*. ■ **B. A.**

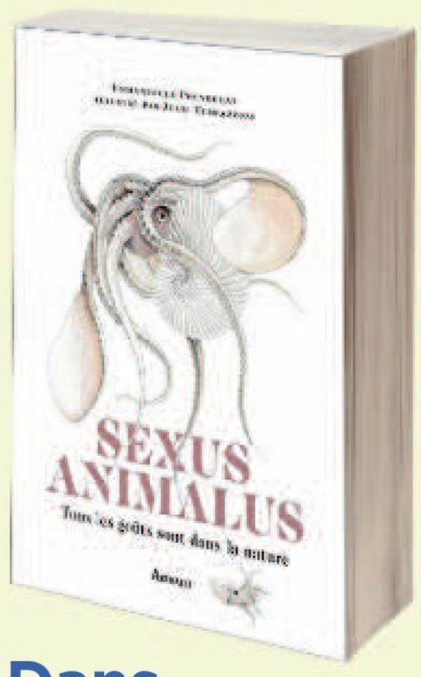


Grotte de Cussac, 30 000 ans, sous la direction de Jacques Jaubert, Éditions Confluences, 210 p., 32 €

Autopsie d'une crise

CHRONIQUE De la *« défaite de Wuhan »* à la course aux vaccins, en passant par le *« populisme scientifique »* de Didier Raoult, les masques, les tests ou encore l'impuissance de l'OMS — *« chef d'orchestre privé de sa baguette »* — *Covid, le bal masqué* décortique les principales étapes, controverses et questions de société qui ont rythmé la pandémie en 2020. Avec la mesure et le sang-froid qu'il a su conserver tout au long de l'année, Antoine Flahault, directeur de l'Institut de santé globale à l'université de Genève (Suisse), livre une chronique incisive, presque chirurgicale, pleine d'anecdotes méconnues qui éclairent « les crises » dans la crise. ■ **H. J.**

Covid, le bal masqué, Antoine Flahault, Dunod, 240 p., 18,90 €

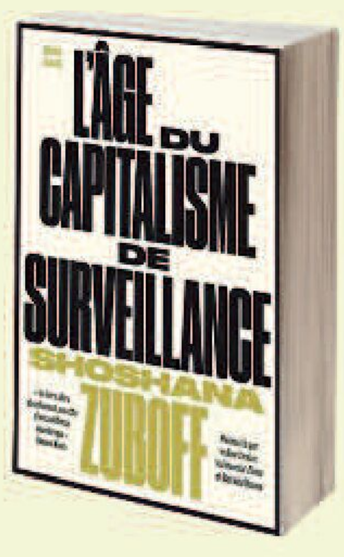


Dans la jungle du sexe

EXPLORATION Pénis et compagnie ! On en trouve des détachables, doubles, truffés d'épines, tactiles, en gouttière, voire chantants. Quant aux clitoris, découvrez les géants ou les épineux. Et si vous pensiez que les humains ont le privilège du plaisir, prêtez donc l'oreille à l'orgasme bien sonore du rat, et n'oubliez pas que les araignées pratiquent avec bonheur le cunnilingus et les chauves-souris la fellation ! Bienvenue dans le monde jouissif de la sexualité animale, décrit d'une plume savoureuse et détaillée par l'éthologue Emmanuelle Pouydebat et mis délicatement en dessins par Julie Terrazzoni. Il y a 400 millions d'années le premier pénis était aquatique, et sa conquête terrestre se déploie avec détermination et une folle inventivité, car l'affaire est d'importance : engendrer plus, engendrer mieux, évincer les concurrents. La diversité des organes de reproduction suit ce postulat. L'exploration se poursuit, d'autant que le clitoris reste le grand méconnu de l'histoire. Voilà qui promet des surprises… ■

Andreina De Bei

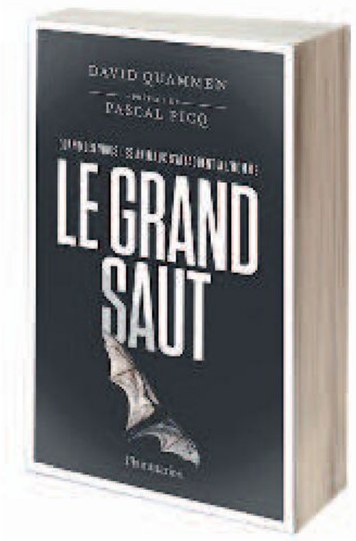
Sexus Animalus. Tous les goûts sont dans la nature, Emmanuelle Pouydebat, illustré par Julie Terrazzoni, Arthaud, 168 p., 19,90 €



Nos vies numériques comme des mines d'or

DONNÉES On l'a oublié mais au début, les fondateurs de Google méprisaient la publicité, préférant tenter d'obtenir une redevance pour leur technologie. Or, peinant à faire des bénéfices, ils ont cédé et inventé le modèle qui a fait leur fortune : la publicité ciblée, fondée sur le gisement jusque-là inexploité des données issues des consultations du moteur de recherche. Ainsi est né ce que Shoshana Zuboff, sociologue et enseignante à Harvard (États-Unis), nomme le capitalisme de surveillance. Cet essai foisonnant, où un historique effarant de Street View côtoie la colonisation des Amériques ou les tortues des Galapagos (!), donne le tournis. Chez Google et ceux qui l'ont imité (Facebook mais aussi Microsoft, IBM, les opérateurs télécoms), chaque rachat, chaque décision stratégique, chaque projet (de la voiture autonome à l'intelligence artificielle Watson) vise l'accaparement de données. L'utilisateur n'est pas un client ni un produit ni un partenaire. Il n'est qu'une mine. Et sa vie, une matière première. ■ **Arnaud Devillard**

L'Âge du capitalisme de surveillance, Shoshana Zuboff, Zulma, 864 p., 26,50 €



Sur la piste sauvage des virus

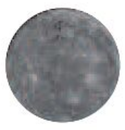
ZOONOSES Où, quand, comment et pourquoi des virus hébergés chez les animaux parviennent à infecter les humains ? C'est cette question complexe du saut d'espèce à laquelle s'est attaqué David Quammen, grande plume scientifique américaine, dont l'ouvrage de référence, *Le Grand Saut*, a été traduit à l'occasion de la pandémie de Covid-19. Les zoonoses n'apparaissent pas au hasard. C'est ce que montre cette enquête fouillée et passionnante, qui, de l'Australie au Gabon en passant par la Chine, présente les chevaux, gorilles, rats ou cerfs à l'origine des principales maladies d'origine animale. ■ **H. J.**

Le Grand Saut, David Quammen, Flammarion, 544 p., 25 €

LE CIEL DE MARS

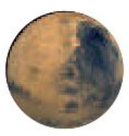
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

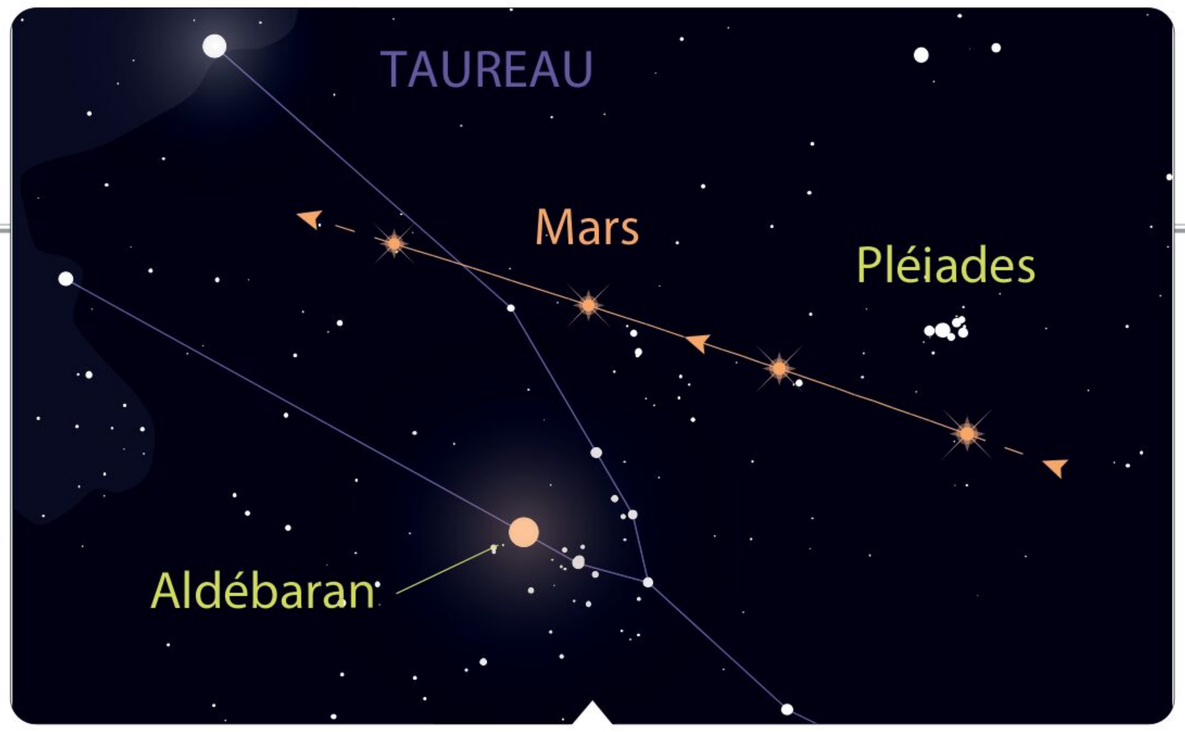


MERCURE
Bien que la petite planète atteigne sa plus grande distance angulaire à l'ouest du Soleil le 6 (plus de 27°), elle demeure, en mars, extrêmement basse dans les lumières du levant sous nos latitudes. Sans une paire de jumelles, il ne sera pas facile de la détecter !

VÉNUS
L'étincelante étoile du Berger passe en conjonction supérieure avec le Soleil le 26 et n'est pas visible durant ce mois.
Nous la retrouverons à la fin du printemps en soirée.



MARS
La planète Rouge est observable dès la tombée de la nuit, à bonne hauteur vers le sud-ouest. Elle décline ensuite pour venir se coucher vers le nord-ouest en milieu de nuit. Sa luminosité, en baisse et désormais comparable à celle d'une étoile de première grandeur, perd encore 30 % au cours du mois.



La position de la planète Mars est indiquée les 1er, 11, 21 et 31 mars. Elle se déplace de la droite vers la gauche de l'image.

Les yeux rouges du Taureau

CE MOIS, LA PLANÈTE MARS traverse le Taureau, constellation visible en première moitié de nuit et dont l'étoile la plus brillante, Aldébaran, est parfois surnommée l'œil rouge. D'une couleur orangée et d'un éclat comparable, Mars peut, en ce moment, figurer le second œil rouge du Taureau. C'est en début de mois que Mars sera au plus près du célèbre amas d'étoiles des Pléiades (moins de 3°) et vers le 20 qu'elle se rapprochera le plus d'Aldébaran (7°).

Notre conseil Tournez-vous vers le sud-ouest en soirée : Aldébaran et Mars sont à mi-hauteur dans le ciel, parfaitement visibles à l'œil nu même en ville.

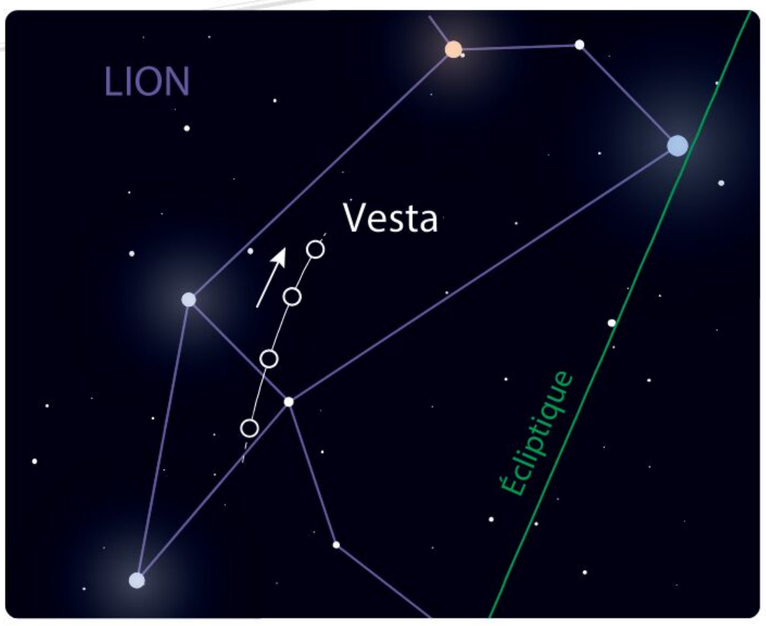
Retrouvez la carte du ciel sur sciav.fr/carteduciel

JUPITER
La planète géante s'extrait lentement des lueurs matinales et devient peu à peu détectable en toute fin de nuit grâce à son fort éclat, très bas vers le levant. En fin de mois, elle se lève 1h30 avant le Soleil.
Elle se trouve actuellement dans le peu spectaculaire Capricorne.

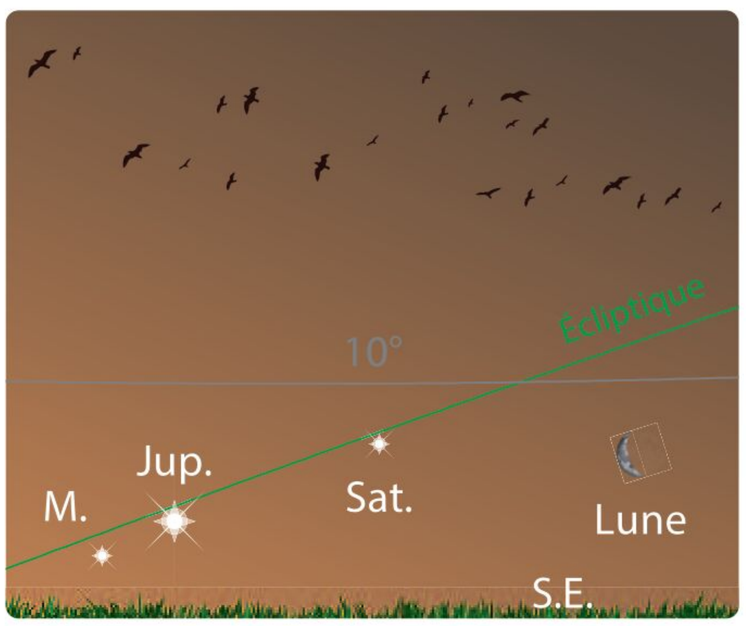
SATURNE
Assez proche de Jupiter en direction, la planète aux anneaux partage les mêmes conditions d'observation, si ce n'est qu'elle est beaucoup moins brillante et se lève une demi-heure avant Jupiter.

L'appli du mois

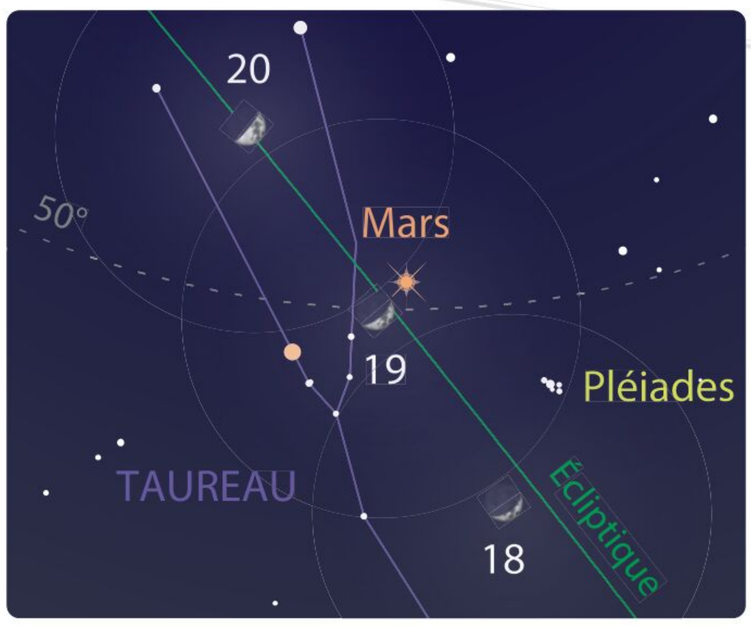
CELESTIA est une application gratuite en anglais disponible sur Google Play et App Store. Ce simulateur spatial permet de voyager depuis la banlieue terrestre jusqu'aux galaxies voisines de la Voix lactée en passant par les planètes du système solaire, avec une grande fluidité et un réalisme souvent saisissant.



CE MOIS, L'ASTÉROÏDE VESTA PASSE À L'OPPOSITION DANS LE LION, une constellation visible toute la nuit. Sa position est donnée tous les dix jours. Vesta est visible aux jumelles.



LE 9, 30 MINUTES AVANT LE LEVER DU SOLEIL, tentez l'observation d'un fin dernier croissant lunaire accompagné de sa lumière cendrée, de Saturne, de Jupiter voire de Mercure (M.).



DU 18 AU 20, LA LUNE REND VISITE À LA PLANÈTE MARS dans la constellation du Taureau. Le 19, les deux astres ne sont séparés que par 2°. Il est ici une heure après le coucher du Soleil.

PRENDRE SOIN DE VOUS, C'EST NOTRE METIER

CHAÎNE THERMALE DU SOLEIL

agit naturellement pour votre santé

1er **choix de destinations**
avec 20 stations thermales dans des cadres naturels exceptionnels.

1er **choix de cures** : Rhumatologie, Phlébologie, Voies Respiratoires, Appareil Digestif, Dermatologie…

1er **éventail de soins exclusifs**, mis au point en concertation avec les Centres Hospitaliers Universitaires, le Corps Médical et les équipes thermales.

1ère **équipe d'experts en médecine et soins thermaux**, complétée d'éducateurs sportifs, diététiciens, psychologues et sophrologues, en relation avec 52 associations de patients.

1er **choix de cures spécifiques** :
Lombalgie, fibromyalgie, gonarthrose, acouphènes, troubles du sommeil, suite de cancer du sein…

1er **suivi médical de post-cure**
à 3, 6 et 9 mois.

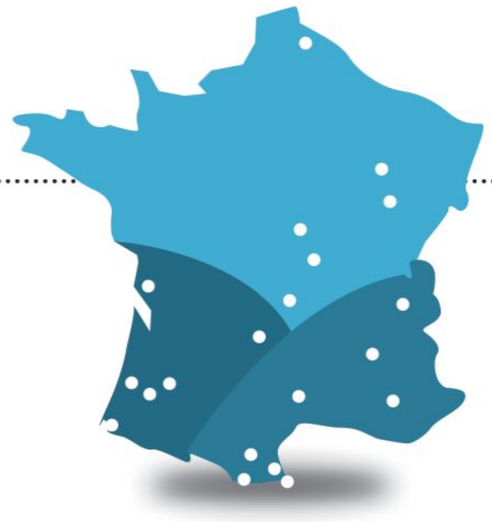
1er **choix d'hébergements** réservables en une fois avec votre cure.

1er **choix de cures pour les actifs** :
mini-cures de 6 jours et cures nocturnes.

1er **choix des curistes** : 190 000 curistes nous ont fait confiance en 2019.

Charte sanitaire station thermale

Toutes nos mesures de protection pour la sécurité et le confort de votre cure sur CHAINETHERMALE.FR



TROUVEZ VOTRE CENTRE DE CURE chainethermale.fr

Documentation & renseignements gratuits

01 88 32 86 36

Je désire recevoir gratuitement le guide 2021 des cures de la Chaîne Thermale du Soleil

Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
Ville : ..... Code postal : .....
Téléphone : ..... Email : .....

Merci de renvoyer ce coupon à :
Chaîne Thermale du Soleil - Centrale de réservation Flandres - 1283 route Fontaine Bouillon - 59230 Saint-Amand-les-Eaux

Les données collectées sur ce coupon font l'objet d'un traitement au sens de la loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978 modifiée et du RGPD. Vos données seront conservées 3 ans afin de mieux communiquer avec vous et vous proposer des produits ou services analogues. Vous disposez, à tout moment, d'un droit d'accès, de rectification, de limitation, d'effacement et de portabilité de vos données, du droit de définir des directives relatives au sort de ces données après votre décès, d'un droit d'opposition et du droit de retirer votre consentement à tout moment. Vous pouvez exercer vos droits par voie postale à l'adresse suivante : CHAINE THERMALE DU SOLEIL, Service de traitement des données à caractère personnel, 32 avenue de l'Opéra, 75002 PARIS ou par email à : dpo@chainethermale.fr. Vous disposez également du droit d'introduire une réclamation auprès de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.

SA0321

Agence MEESTERS - Crédit photo : Marielsa Niels

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ÉNERGIE

Quel est le coût énergétique du bitcoin ?

Jessica L.

Chaque transaction requiert environ 215 kilowattheures d'énergie, plus que la consommation énergétique d'un ménage français en deux semaines ! Ces transactions demandent en effet des calculs informatiques complexes. D'un point de vue global, des chercheurs danois ont évalué, dans la revue *Environnemental Science & Technology*, la consommation d'électricité du bitcoin en 2018 à 31,3 térawattheures, soit l'équivalent de celle d'un pays comme le Danemark en un an. Pour la première fois de son histoire, le 7 janvier 2021, la valeur du bitcoin a dépassé 40 000 dollars (32 600 euros). Bonne nouvelle pour les investisseurs, moins bonne pour l'environnement. ■ **L. L.**

COGNITION

Pourquoi ne garde-t-on pas le souvenir de nos premières années de vie ?

Ludovic M.

Pour la plupart d'entre nous, impossible d'avoir des souvenirs d'avant nos 3 ans. Les spécialistes nomment ce phénomène l'« amnésie infantile ». Une étude conduite à l'université Emory d'Atlanta (États-Unis) a permis de conclure que c'est en fait à 7 ans que les souvenirs de la prime enfance commencent à s'estomper. Cet effacement progressif permet la mise en place d'une mémoire autobiographique plus performante. Celle-ci permet aussi bien de dater nos souvenirs que de bâtir notre sentiment d'identité.
Et son développement reposerait tout autant sur des facultés d'oubli que sur des processus de mémorisation. ■ **M. N.**
@Mathieu_Nowak

KYLE MONK/DEEPOL/PLAINPICTURE

C'est en repensant au voyage que le cerveau modifie sa perception du temps.

NEUROSCIENCES

Pour quelle raison le trajet aller paraît-il plus long que le retour ?

Benjamin M.

En voiture, en train ou en avion, le constat est le même : le trajet aller semble plus long que le retour, même si la distance et le temps réel sont identiques. C'est à notre seul cerveau que l'on doit cette erreur de perception du temps, selon une étude réalisée en 2015 par une équipe japonaise de l'université d'Osaka. Les chercheurs ont demandé à vingt personnes de regarder plusieurs vidéos, d'une durée de 26 minutes environ, réalisées à partir d'images captées par une caméra accrochée à la poitrine d'un marcheur. La moitié des participants ont regardé un aller-retour effectué sur une même route, tandis que les autres ont suivi la vidéo de deux trajets distincts. Durant l'expérience, chaque individu, dépourvu de montre, devait signaler à quel moment trois minutes s'étaient, selon lui, écoulées. Résultat, si les deux groupes ne semblaient pas ressentir le temps de manière différente au moment de l'expérience, c'est après coup que tout change. En y repensant, le cerveau reproduit le voyage et le jugement est modifié : sur la foi des souvenirs, le retour semble plus court. En 2011, des chercheurs néerlandais de l'université de Tilbourg avaient déjà émis l'hypothèse que cette erreur de perception s'explique par un phénomène appelé « la violation des attentes » : à l'aller, le déplacement, attendu avec optimisme, paraît plus long que prévu ; un phénomène qui s'estompe au retour car la longueur du trajet est déjà intégrée. ■ **Lise Loumé**
@lysLoume

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 888, février 2021

Grinceurs ou souquets ?

Si nous prenons les affirmations 1, 4 et 2 dans cet ordre :
Les grinceurs sont des souquets, les souquets sont des parfiles, et les parfiles sont des turbons. 1, 4 et 2 peuvent coexister si l'on supprime la proposition 3, en contradiction avec elles.

Le poids des planches

Pour avoir un maximum de poids, il faut attribuer le 9 à la lettre présentant la plus forte occurrence, 8 à la deuxième, etc.

Les Précieuses ridicules

Lettres	C	D	E	I	L	P	R	S	U
Occurrences	2	1	5	3	2	2	4	4	1
Poids	6	3	9	7	5	4	8	8	1
TOTAL	**12**	**3**	**45**	**21**	**10**	**8**	**32**	**32**	**1**

CUMUL = 134

Le Malade imaginaire

Lettres	A	D	E	G	I	L	M	N	R
Occurrences	4	1	3	1	3	2	2	1	1
Poids	9	4	8	3	7	6	5	2	1
TOTAL	**36**	**4**	**24**	**3**	**21**	**12**	**10**	**2**	**1**

CUMUL = 113

Les *Précieuses ridicules* arrivent largement en tête. Cela est dû au fait que la plus forte occurrence d'une lettre est 5 (l'e) contre 4 au *Malade imaginaire* (l'a).

Couples

Soit x le nombre de maris plus grands que leur femme,
y le nombre de maris plus lourds que leur femme
et z (la réponse que nous cherchons) le nombre de maris plus grands et plus lourds que leur femme.
Nous avons :
1) z = 2x/3, z = 3y/4, soit 8x/3 = 9y/3 en réduisant au même dénominateur donc 8x = 9y
2) 1000 = x + y + 120 - z, soit 880 = x + y - z
Si nous remplaçons y et z par leurs valeurs en x, on obtient :
880 = x + 8x/9 - 2x/3
En réduisant au même dénominateur, cela donne :
880 = 11x/9, soit x = 720 et y = 8x/9 = 640
z = 2x/3 = 3y/4 = 480

Asimov au goutte-à-goutte

Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, en restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger.

Altitudes

1	5	3	7	2	6	4
4	1	6	3	5	2	7
3	7	5	2	4	1	6
5	2	7	4	6	3	1
7	4	2	6	1	5	3
6	3	1	5	7	4	2
2	6	4	1	3	7	5

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 880
Covid-19 : ce dont on est sûr

N° 881/882
Les nouvelles découvertes

N° 883
Les secrets de l'antimatière

N° 884
Hérédité : ce que révèlent les tests

N° 885
Guérir avec la génétique

N° 886
L'IA au service de l'intelligence humaine

N° 887
La fin de l'Univers

N° 888
Vaincre le stress

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : **7 €** par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

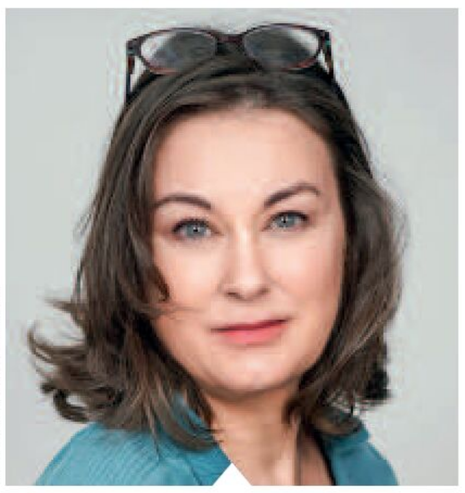
❑ N° 880 ❑ N° 881/82 ❑ N° 883 ❑ N° 884
❑ N° 885 ❑ N° 886 ❑ N° 887 ❑ N° 888

Nom : . . . . . .
Adresse : . . . . . .
. . . . . Ville : . . . . . .
Code postal : . . . . . .

La science a besoin de plus de femmes

La généticienne Aude Bernheim et l'économiste Elyès Jouini plaident pour que les femmes investissent tous les domaines scientifiques. Le fort déséquilibre actuel a en effet des conséquences directes sur la qualité des travaux et l'innovation.

Dialogue animé par Rachel Mulot @RachelFleaux



BERNARD MARTINEZ

Rachel Mulot, cheffe du service Enquêtes à « Sciences et Avenir-La Recherche ».

Dans le monde entier, les femmes ne comptent que pour 33 % des scientifiques. Dans certains domaines comme l'ingénierie, les mathématiques, les technologies de l'information et de la communication, elles ne représentent que 3 % des étudiantes. Comment expliquer ces chiffres ?

Elyès Jouini. : L'effacement des femmes s'opère très tôt dans les études. À chaque étape d'orientation, elles disparaissent progressivement du champ scientifique, et plus encore des mathématiques, de l'informatique, des sciences physiques. Ce n'est pas une question de niveau, mais le résultat d'un environnement et d'une construction sociale. Ainsi, dans les années 1980, les femmes étaient davantage présentes en informatique, mais à l'époque c'était une simple discipline de service, alors qu'aujourd'hui, elle est centrale pour l'avenir de nos sociétés, avec notamment la montée en puissance de l'intelligence artificielle. Tout se passe comme si, à partir du moment où une discipline devient un enjeu de pouvoir, elle est captée par les hommes, au détriment des femmes. Déjà, au XIX^e^ siècle, alors que le latin et le grec étaient les voies du savoir et du pouvoir, Kant disait : *« Une femme qui sait le grec est si peu une femme qu'elle pourrait aussi bien avoir une barbe. »* On observe aussi que plus on grimpe dans les postes de direction ou de prestige, moins le nombre de femmes est important. C'est la même mécanique qui opère.

Aude Bernheim : Les choix de chacun sont influencés par les représentations associées aux sciences, l'école, les relations interpersonnelles, l'éducation familiale... Les neurosciences montrent que les constructions sociales ont un effet même sur le cerveau, qui n'est pas finalisé à la naissance. Il est influencé par ce qu'on nous donne à apprendre, la façon même dont on nous parle. Des études prouvent que l'on s'adresse différemment à un bébé selon qu'il est une fille ou un garçon : *« Tu es jolie, douce »* ; *« tu es très fort »*. Dès cet âge, on dit ce que la société attend de nous. Du coup, certains de nos comportements ne sont pas innés, mais acquis, construits très tôt.

Plus un pays est riche, développé, « égalitaire », moins les femmes sont présentes dans les sciences « dures », selon une étude de 2018. Comment expliquer ce « paradoxe de l'égalité » ?

E. J. : Ce travail fondé sur des données Pisa (Programme international pour le suivi des acquis des élèves) se focalisait sur le niveau et les choix d'orientation des élèves. Certains en ont conclu que puisque les filles ne choisissaient pas les sciences dans des pays où elles étaient libres de le faire, c'est qu'intrinsèquement, elles n'aimaient pas cela... Circulez ! Avec Thomas Breda et Clotilde Napp, du CNRS, nous avons creusé la question en 2020, sous l'angle des stéréotypes. Car Pisa interroge également les élèves sur leur environnement socio-économique, les attentes de leur entourage et leurs objectifs : *« Est-ce que réussir en maths ne dépend que de vous ? »* ; *« est-ce que vos parents pensent que les études de mathématiques sont importantes pour votre carrière et pour votre futur ? »*. On observe un fort écart entre les réponses moyennes des garçons et celles des filles. Il n'est pas le même dans tous les pays, et les stéréotypes liés à la place des femmes dans les disciplines scientifiques sont beaucoup plus

NICOLAS FAGOT - BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

forts dans les pays riches et développés. Et plus que le niveau de développement du pays, il explique mieux selon nous, l'écart entre les deux sexes en mathématiques, sujet de notre étude.

Comment expliquer que les stéréotypes soient si forts dans les sociétés qui se veulent plus égalitaires ?

E. J. : Schématiquement, dans des sociétés traditionnelles, les normes de genre sont pour les femmes de rester à la maison et pour les hommes de travailler, les premières n'étant pas appelées à faire des études supérieures : la différenciation est verticale. En revanche, dans les pays plus égalitaires et développés, les normes sociales et les normes de genre [qui stipulent les rôles sociaux assignés à chaque sexe], ne disparaissent pas, mais se reconfigurent : elles deviennent des différenciations horizontales qui s'opèrent plutôt sur le champ disciplinaire. « *Les femmes sont quand même mieux à leur place dans les études littéraires et les hommes à leur place dans les études scientifiques !* » Cette reconfiguration est plus subtile, difficile à identifier et à dépasser.

L'absence de femmes aurait des conséquences sur les sciences elles-mêmes, selon l'Union européenne. En quoi serait-il innovant d'intégrer davantage de chercheuses ?

A. B. : Une des raisons très convaincante est que les personnes qui font la science la font aussi pour elles-mêmes, s'intéressent à ce qui va les concerner. Voyez la fécondation : on s'est longtemps focalisé sur la course, la compétition entre les spermatozoïdes, on a négligé le rôle de l'ovule ou des ovocytes et pris des décennies de retard ! Nos stéréotypes, la façon dont nous pensons influencent les questions de recherche et la façon dont on va les résoudre. En santé, les études sont menées uniquement sur les rats mâles, plus faciles à étudier parce que les femelles ont des cycles hormonaux. C'est absurde : dans la vraie vie, c'est le cas aussi ▶

Elyès Jouini, professeur de mathématiques et d'économie à l'université Paris-Dauphine, est responsable de la chaire Unesco « Femmes et science » qui vise à développer et diffuser les travaux sur la place des femmes dans les matières scientifiques et l'impact de leur faible présence.

Aude Bernheim, chercheuse à l'Inserm en génétique microbienne est coauteure de *L'Intelligence artificielle, pas sans elles* (Belin, 2019) et cofondatrice de l'association scientifique et féministe, WAX Science, qui lutte contre les stéréotypes.

des femmes. Pour les maladies cardiaques, on a aussi tardivement découvert qu'elles avaient des symptômes très différents, méconnus. Si l'on prend en compte la différence de sexes et de genre, cela nourrit la recherche. Et c'est une problématique essentielle sur le Covid-19. Il y a beaucoup plus d'hommes qui meurent. Pourquoi ? Est-ce uniquement une question de genre, dans la façon dont les gens interagissent, prennent plus de risques, sont plus exposés ? Ou est-ce une question de sexe, avec des systèmes immunitaires réagissant différemment ? Selon une étude de 2017, les équipes mixtes prennent plus en compte la dimension du sexe et du genre dans la recherche. Avec 30 % de femmes seulement en sciences, on avance beaucoup moins vite.

« Les équipes mixtes prennent davantage en compte la dimension du sexe et du genre dans leurs recherches »
Aude Bernheim

E. J. : C'est une question d'efficacité sociale. Si la moitié de la population s'autocensure, on perd des forces vives qui, du coup, vont se retrouver dans d'autres domaines où elles ne sont peut-être pas les plus douées. Et dans le champ scientifique, on accueille des personnes qui ne sont pas non plus forcément les meilleures. Le discours des sciences, longtemps tourné vers la guerre, la conquête a certainement été modelé par l'absence de femmes. Quant à celles qui y ont travaillé, elles ont longtemps et souvent été invisibilisées au profit des hommes.

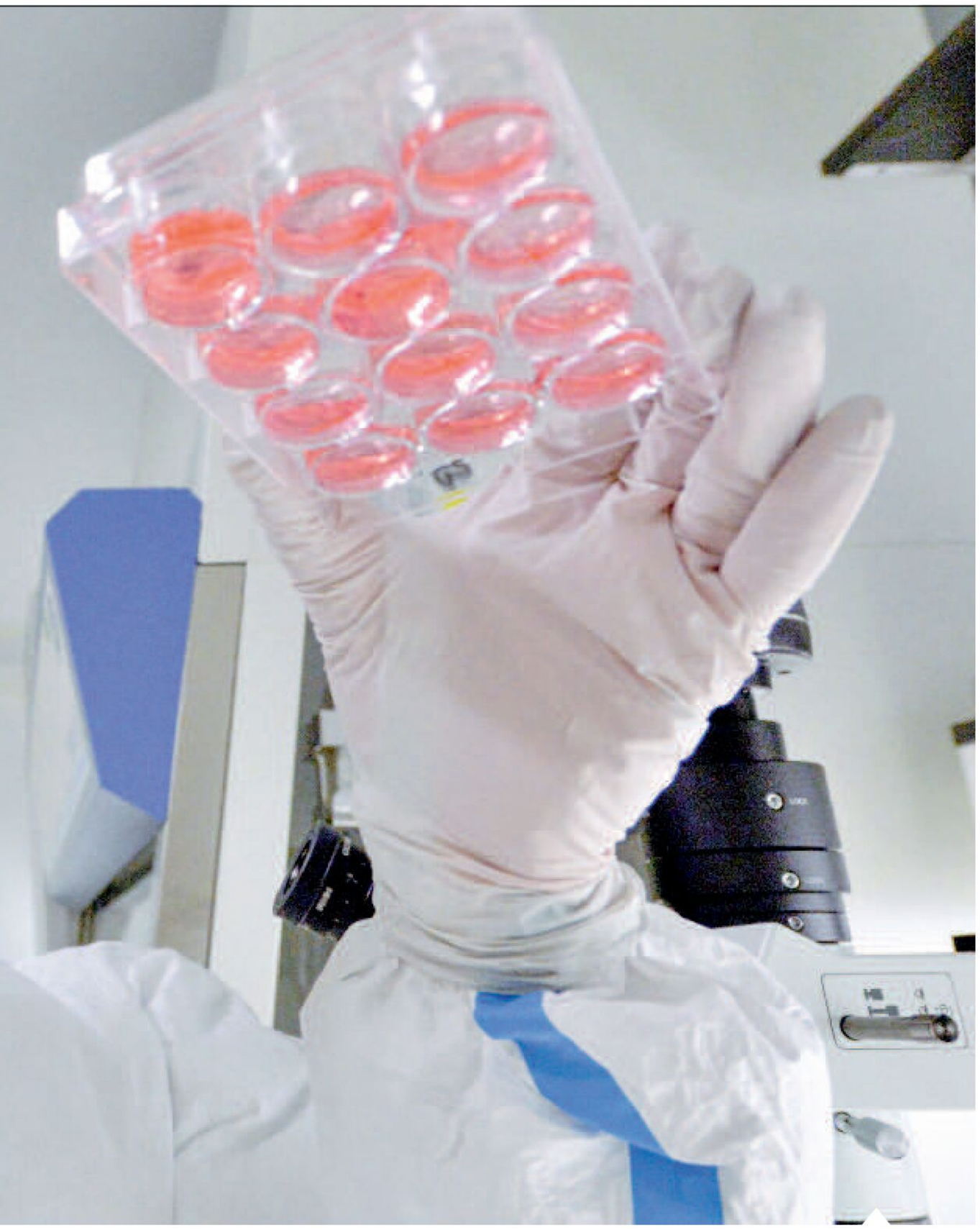
Aude Bernheim, vous plaidez pour que l'intelligence artificielle ne se fasse « pas sans elles ». Elles ne sont que 22 % parmi les professionnels du secteur.
A. B. : Ce secteur, et celui des GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft), est dominé à 80 % par des hommes blancs, jeunes qui reproduisent quelle que soit leur bonne volonté, les préjugés de la société dans laquelle ils vivent. Toutefois, l'illusion de la « neutralité des algorithmes » — mis au point par ces humains — a été très vite remise en question. Qu'il s'agisse de la reconnaissance faciale, performante pour les hommes blancs, défaillante pour les femmes noires, de statistiques racistes sur les risques de récidive de délinquants ou encore des logiciels de recrutement qui favorisaient les candidatures masculines. En se basant sur les données de l'existant et les biais du passé — femmes moins payées à CV équivalent, promotion des hommes dans les lieux d'influence — l'IA fait perdurer voire aggrave les inégalités. Mais ces biais ont été très vite dénoncés, souvent par des femmes, issues de minorités. Et des correctifs peuvent être apportés. C'est une source d'optimisme : dans le domaine de l'IA, on avance un peu plus vite que dans d'autres disciplines où les problèmes sont connus mais ne sont pas réglés.

E. J. : Il faut maintenir la pression et réfléchir aux blocages qui se présentent tout au long des carrières féminines, du recrutement à la maternité.

Faut-il instaurer des quotas ?
E. J. : Mon équipe a un travail en cours de publication, qui montre que, non seulement les filles choisissent moins les filières scientifiques que les garçons, mais que de surcroît, elles tiennent moins compte de leur niveau. En d'autres termes, ce ne sont pas forcément les meilleures qui y vont. Il faut être extrêmement attentif, si on met en place des quotas, à vraiment pousser en avant celles qui sont le plus à même de réussir dans ces filières, et pas seulement celles qui ont entendu parler de ces dispositifs de discrimination positive. Le plus important est vraiment de lutter contre les stéréotypes.

A. B. : Cela passe par la médiatisation des travaux de femmes, la mise en avant de modèles. Un pro-

LE + NUMÉRIQUE
À VOIR : la version intégrale du débat en vidéo sur notre site **sciav.fr/dialogues**



PATRICK ALLARD/REA

La mise en avant de chercheuses et de leurs travaux pourrait permettre aux jeunes filles de choisir des filières scientifiques en s'identifiant à ces nouveaux modèles.

blème est que ces dernières ont tendance à moins se mettre en avant. Quand elles ne sont tout simplement pas effacées, comme lors de la crise du Covid-19, où les télévisions ont fait quasi exclusivement appel à des hommes. Les rares femmes qui se sont exprimées, comme l'infectiologue Karine Lacombe, ont vécu un déferlement d'injures et menaces sexistes. Cela peut décourager les plus motivées. Les institutions ne peuvent seules régler le problème. Heureusement, les associations sont de plus en plus nombreuses à jouer un rôle majeur, en mettant en place des mentorats, délivrant des prix. Leur investissement peut changer la donne. ■

« Il faut maintenir la pression et réfléchir aux blocages qui se présentent tout au long des carrières féminines »

Elyès Jouini

La Recherche
Éthique

PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA *

Généalogie du consentement éclairé

Depuis Hippocrate de Cos au IVe siècle avant Jésus-Christ, beaucoup s'accordent à dire que la vocation des médecins est d'accroître le bien-être physique et moral et qu'ils ne doivent, en aucun cas, nuire par leur action, par exemple en procurant du poison. Mais à l'issue de la Seconde Guerre mondiale, on découvrit, avec horreur, les crimes perpétrés par les nazis et, en particulier, les terrifiantes expérimentations médicales qu'ils conduisirent dans les camps. Il apparut alors nécessaire d'ajouter aux deux premières exigences de la médecine hippocratique — faire le bien et ne pas nuire — une autre : considérer les sujets comme des agents autonomes que l'on informe des expérimentations dans lesquelles on les inclut et qui donnent librement leur accord. Le consentement éclairé trouve donc son origine en 1947, dans le code de Nuremberg, qui stipule les règles auxquelles doivent obéir des expérimentations médicales pour être considérées comme légales. Cela n'empêcha pas la poursuite, aux États-Unis, de l'étude de Tuskegee sur la syphilis jusqu'en 1972, sans information ni consentement des sujets, alors qu'un traitement efficace existait depuis 1942 ! Il fallut attendre le rapport de Belmont (États-Unis) en 1979, pour que cela entre effectivement dans la législation américaine. En France, depuis 2002, une nouvelle étape a été franchie : l'exigence d'un consentement libre et éclairé de la personne s'étend à tout acte, tout traitement et tout examen médical. C'est là un progrès en ce sens qu'on considère le malade non comme un simple patient, mais comme un acteur autonome et responsable de sa santé. Toutefois, il ne faudrait pas que cela conduise — parce que l'explication a été mal comprise ou que des informations fausses circulent — à abandonner les malades dans un refus obstiné, obscurantiste et irraisonné de soins et de mesures de prévention, sous prétexte qu'ils sont autonomes.

> « En France, depuis 2002, le malade est considéré comme un acteur autonome et responsable de sa santé »

* Président du comité d'éthique du CNRS, professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS). Dernier ouvrage publié : *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Le Seuil, 2017.

BRUNO LÉVY

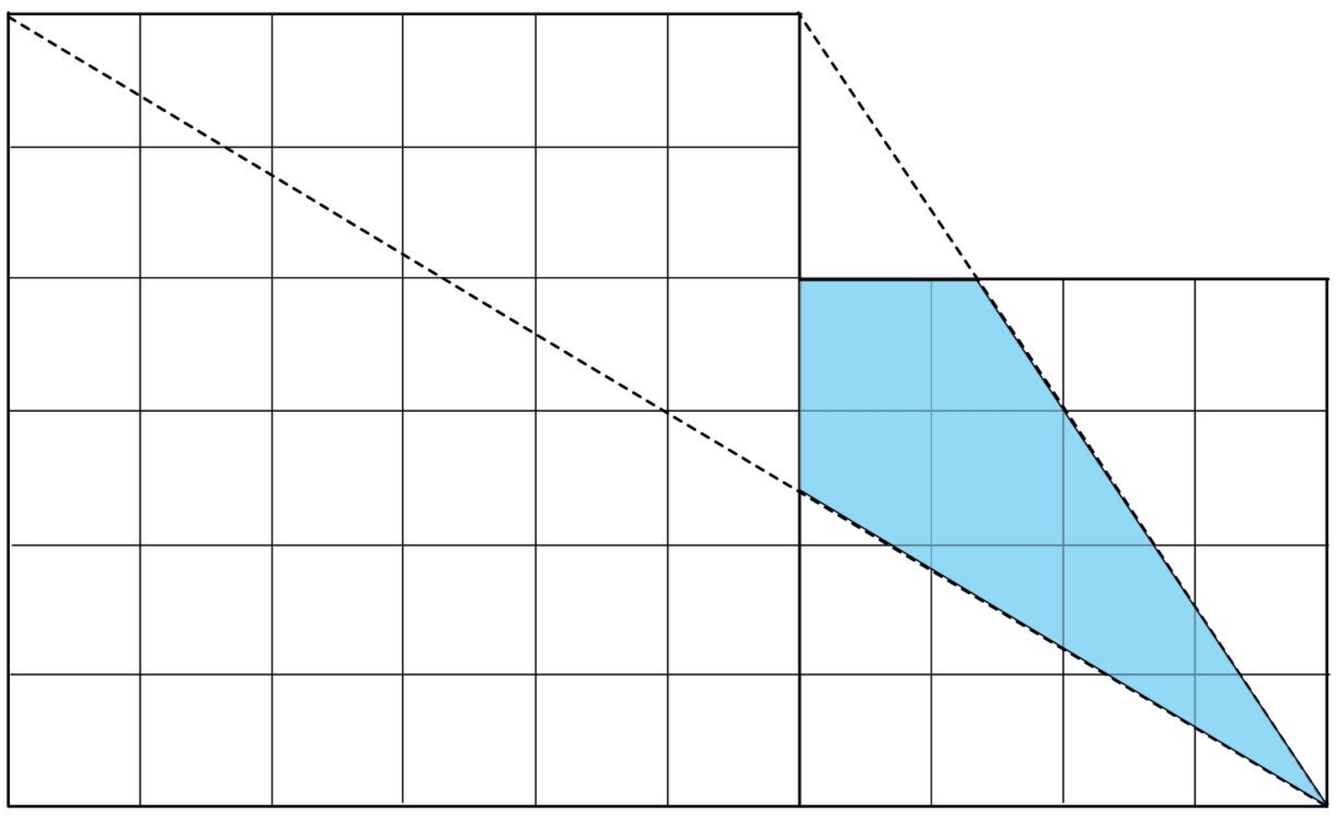
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Pythagore fait tache

Deux diagonales tracées sur deux carrés de côtés 4 et 6 délimitent la zone colorée en bleu. Quelle est son aire ?



La danse des astres

Dans chacun de ces ensembles, des noms se lisent en suivant des lettres qui se touchent, dans les quatre directions. Trouvez 12 astronomes à gauche et à droite 9 astronomes, dont 7 en commun, plus 2 astrophysiciens (en rouge, l'astronome Arago que l'on retrouve des deux côtés).

L A G L P L E R R P P F L M A S R E
I L R E E K V E I I A R A M R C H H
C E E E L O O R E H S Q U O I E E L
O P E M E T G A R E E P E N E L B B
R E E Q U P N R A E V T O L E R H U
N I H R H I E W E R A R O E M E I S
Y C A A P P O T I E L A G E E M E S
E L L B E I N M R V O R G A L N T O
E H A R R S S E R E N E V L I E W N

La danse des Deux

Les Deux, pour peu qu'ils soient assez nombreux, accomplissent beaucoup. Ainsi il est possible d'obtenir les nombres de 0 à 16, chaque fois avec 5 chiffres 2 et en utilisant seulement les quatre opérations courantes + ; - ; x ; / et les parenthèses, comme : 2 x (2 - 2 + 2 - 2) = 0.
Que trouverez-vous pour chacun des autres nombres jusqu'à 16 ?

Le paradoxe de Pigeolet

La revue *Sphinx* proposa en 1932 cette curieuse situation, imaginée par M. Pigeolet, ici adaptée.
Un faussaire amateur réalise un billet de 1000 € qu'il parvient à écouler pour acheter un vélo, puis disparaît. Le commerçant s'aperçoit le lendemain de l'escroquerie mais, plutôt que de saisir la justice, utilise la fausse coupure pour régler son tapissier. Le tapissier fait de même, etc., le faux billet passant de main en main par dix commerçants jusqu'à ce que le dernier l'utilise pour rembourser un prêteur. Ce dernier décide d'arrêter là le parcours, retrouve les commerçants, les réunit et leur dit : *« En bons gestionnaires, vous avez fait chacun une marge d'au moins 20 % sur votre vente. Donnez-en moi chacun la moitié, soit 100 €. Ainsi je suis quitte, vous avez chacun gagné au passage et l'affaire est close. »*
Comment un faux billet a-t-il pu permettre à un faussaire d'acquérir un vélo et faire gagner 100 € à dix commerçants ? Trouverez-vous une explication logique à ce « paradoxe » ?

Statistiques

Dans une entreprise de 100 personnes, on compte que :
- 85 ont une cravate,
- 70 ont des lunettes,
- 75 ont des chaussures noires,
- 80 mesurent plus de 1,75 m.

Quel est le nombre minimum ayant à la fois une cravate, des lunettes, des chaussures noires et mesurant plus de 1,75 m ?

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE
dès **5€**

LABORATOIRES ILAPHARM

www.ilapharm.com

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Tonique veineux
MARRON D'INDE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

5€ 45 gélules ~~10,60€~~

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3)*

5€ 45 gélules ~~10,70€~~

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids**. *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules ~~11,40€~~

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel**.

6€ 45 comprimés ~~12,40€~~

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7€ 45 gélules ~~14,70€~~

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure **un sommeil de qualité**. Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules ~~11,10€~~

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

5€ 45 capsules ~~10,80€~~

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

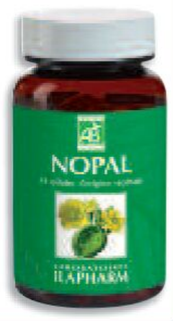
Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**.

*(6). Allergène : **poisson**.*

6€ 45 gélules ~~10,70€~~

Minceur
NOPAL BIO

Absorbe une partie des **graisses** et des **sucres ingérés**, limitant ainsi l'apport calorique.



6€ 45 gélules ~~11,70€~~

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran Bio aide à **améliorer l'érection** et **stimule le désir sexuel**. *(2), (4).*

7€ 30 gélules ~~15,60€~~

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire**.

6€ 45 gélules ~~11,70€~~

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie**.

6€ 10 ampoules ~~13,50€~~ *(1)*

Capacité sexuelle
TRIBULUS

Elle favorise le **désir**, la **capacité** et les **performances sexuelles** et participe à la bonne santé des organes reproducteurs.

7€ 60 gélules ~~15,60€~~

Un esprit vif
GINKGO BILOBA BIO

Arbre de jouvence, il favorise votre circulation cérébrale pour **un esprit vif et alerte**. *(2), (8).*

6€ 45 gélules ~~11,00€~~

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations.

Gardez le plaisir de bouger !

5€ 45 gélules ~~10,60€~~

Défenses naturelles
ÉCHINACÉA BIO

Aide au bon fonctionnement du système de **défenses naturelles et respiratoire** (bouche et gorge).

6€ 45 gélules ~~11,00€~~

Vos 3 Cadeaux

LES 2 COUTEAUX CÉRAMIQUE 100% céramique OFFERTS

Livrés avec une protection sur la lame.

Dimensions : L16,5 x l2 x H1 cm.

Les Frais de Port 0€
Dès 15€ d'achat **OFFERTS**

dès 5€ Tous vos produits ÉCONOMISEZ PLUS DE 50%

Harpagophytum BIO	~~10,70~~	5,00€
Artichaut - Radis Noir	~~13,50~~	6,00€
Marron d'Inde BIO	~~10,60~~	5,00€
Silicium Organique & Vit. C	~~14,70~~	7,00€
Tribulus	~~15,60~~	7,00€
Mes 2 Couteaux Céramique		**OFFERTS**
Frais de port	~~5,80~~	**OFFERTS**
TOTAL	~~70,90~~	**30,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des anti-dépresseurs. (5) Contient de la caféine (45 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (8) Ne pas associer avec des anti-coagulants. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

OFFRE DÉCOUVERTE SANS ENGAGEMENT - BON DE COMMANDE

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_|_|_|19|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Newsletter ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

et des **partenaires d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

**Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N°|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Marron d'Inde BIO	PMDB45		5€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		6€	
Nopal BIO	PNOB45		6€	
Safran BIO	PSFB		7€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR		7€	
Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Echinacéa BIO	PECB45		6€	
☐ Je reçois **GRATUITEMENT** mes **2 COUTEAUX** et mon **CATALOGUE**				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€ , **j'économise 5,80€ sur les frais de port**				**OFFERTS**
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 5,80€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS419**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Versailles B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 5,80€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (60 rue de la Boétie - 75008 Paris-relationconso@fevad.com). Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires Ilapharm, cochez cette case □ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case □ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · Traitement Rapide 24h COLIECO

POUR COMMANDER :

Par internet :
www.ilapharm.com

Par téléphone :
01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi : 9h-13h et 14h-18h

Par courrier :
Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL, BP 60475, 35171 BRUZ CEDEX

Les contenants en plastique (PE, PP, PEHD), verre, papier, carton, les couvercles des flacons plastiques ainsi que tous les documents papiers sont recyclables.

L'OR

Découvrez

L'ALLIANCE PARFAITE
D'ARÔMES INCOMPARABLES

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS – 30 BIS RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE – 810 029 413 RCS PARIS – SAS AU CAPITAL DE 16.594.157,70 EUROS.